

Zastosowanie ultrawytrzymałych materiałów po procesie wyciskania hydrostatycznego w nowoczesnych rozwiązaniach przemysłowych

Mariusz Kulczyk

Wstęp

Pomimo coraz częstszych zastosowań kompozytów metale i stopy nadal pozostają podstawowymi materiałami na elementy konstrukcyjne. Wynika to z faktu ciągłego poprawiania ich właściwości mechanicznych, przede wszystkim wytrzymałości na rozciąganie, wiązkości i właściwości zmęczeniowych. Możliwości poprawy ww. właściwości metodami konwencjonalnymi, tj. poprzez dodatki stopowe i obróbkę cieplną, dochodzą do swojego kresu. Stąd rozdrabnianie struktur metali (ziaren) do skali nanometrycznej jest obecnie jedną z najbardziej obiecujących dróg podnoszenia właściwości mechanicznych metali. Stopień umocnienia materiałów na drodze rozdrobnienia ziaren opisuje zależność Halla-Petcha, według której granica plastyczności materiału zwiększa się ze stopniem rozdrobnienia ziaren [1, 2]. Jak wynika z powszechnie znanej zależności Hall-Petch'a zaobserwowano znaczące podniesienie wytrzymałości przy zredukowaniu wielkości ziarna poniżej 100 nm. Materiały takie określa się mianem materiałów o strukturze nanokryształicznej, a w zakresie wielkości ziarna pomiędzy 100 nm a 500 nm – o strukturze ultradrobnoziarnistej. Unikalną technologią o dużym znaczeniu komercyjnym (przemysłowym) w porównaniu z rozwiązaniami stosowanymi w Unii Europejskiej jest metoda wyciskania hydrostatycznego HE (rys. 1 a). Metoda ta, dzięki wykorzystaniu wysokich ciśnień, pozwala na bardzo silną deformację metali i stopów, powodując zmianę ich mikrostruktury prowadzącą do uzyskania bardzo wysokich właściwości mechanicznych. Zastosowanie wyciskania hydrostatycznego jest rozwiązaniem nowatorskim, unikalnym

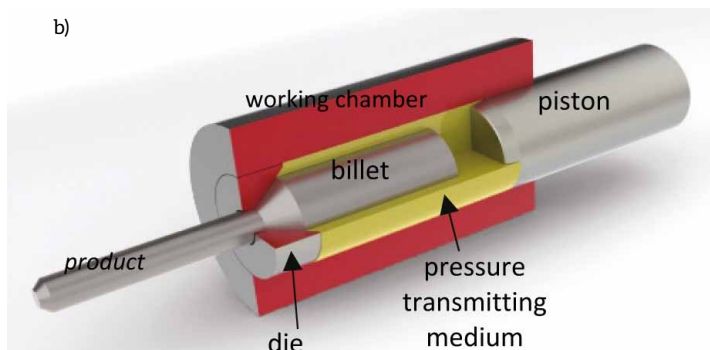
Streszczenie: W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę wysokociśnieniowej przeróbki plastycznej metali i stopów metali metodą wyciskania hydrostatycznego. Opisano zalety procesu ze szczególnym uwzględnieniem możliwości rozdrabniania struktury metali i stopów metali do poziomu nanometrycznego lub ultradrobnoziarnistego, skutkującego znacznym podniesieniem ich właściwości mechanicznych. Pokazano przykłady praktycznego zastosowania przerabianych plastycznie metali, tj.: stali austenitycznej 316L na elementy złączne, miedzi stopowej CuCrZr na elektrody do procesu zgrzewania punktowego oraz tytanu do zastosowania na implanty medyczne.

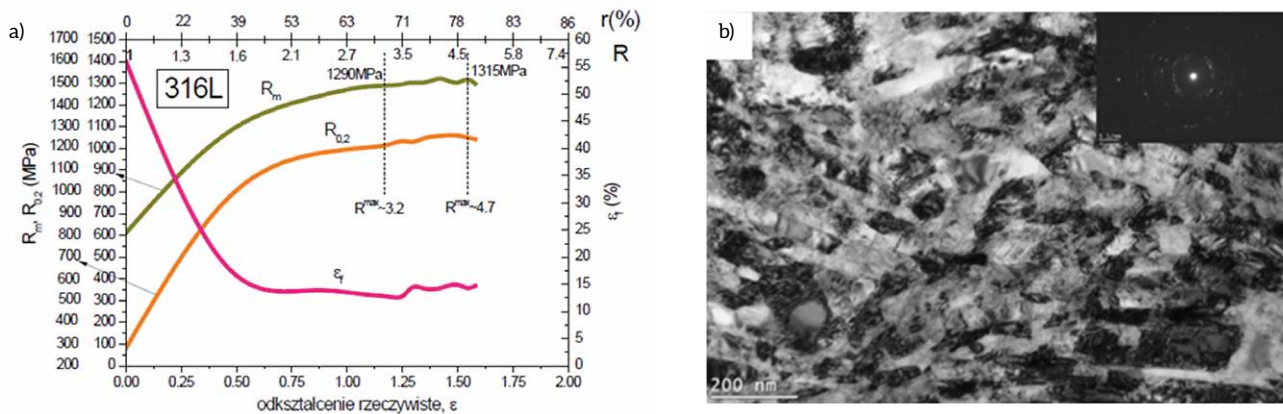
APPLICATION OF THE ULTRA-HIGH MATERIALS OBTAINED BY HYDROSTATIC EXTRUSION IN MODERN INDUSTRY.

Abstract: The general characteristic of the metals and alloys plastic deformation under high pressure by hydrostatic extrusion processing is presented. The advantages of the process, with special focus on the structural grain refinement to the ultra-fine and nanocrystalline grain size levels resulting in significant increase of the material strength are described. Examples of the commercial application of working materials, as the 316L austenitic stainless steel for fixing elements, the CuCrZr copper alloy for spot welding electrodes and commercial purity titanium for medical implants are demonstrated.

Rys. 1.

a) Prasa do procesu wyciskania hydrostatycznego;
b) schemat procesu wyciskania hydrostatycznego





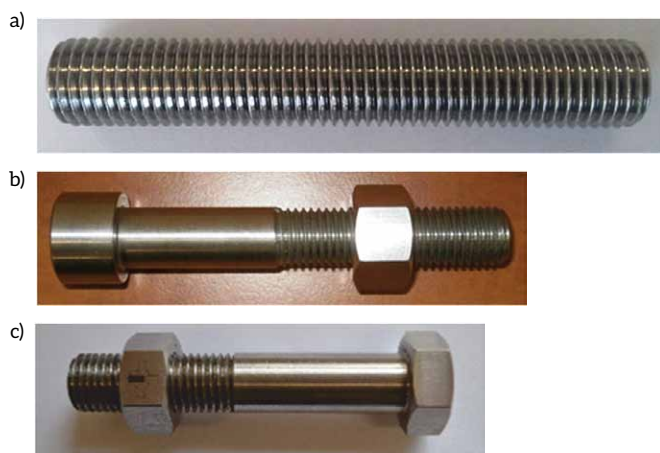
Rys. 2. a) Zmiany właściwości mechanicznych stali austenitycznej w funkcji odkształcenia rzeczywistego po procesie wyciskania hydrostatycznego; b) mikrostruktura stali austenitycznej 316L po procesie wyciskania hydrostatycznego z odkształceniem rzeczywistym $\varepsilon = 1.5$ [10]

w skali światowej. Efektywne zastosowanie HE stwarza szanse na osiągnięcie zysków ze sprzedaży materiałów wysokoprzeznaczonych o wysokich i specjalnych właściwościach mechanicznych, nieosiągalnych w materiałach oferowanych na rynku. Metoda ta pozwala na efektywniejszą niż to ma miejsce w klasycznych metodach przeróbki plastycznej deformację materiału na zimno, co pozwala uzyskać w produkowanych elementach złącznych wytrzymałości przekraczające najwyższe wartości znormalizowane i sklasyfikowane. Jedną z głównych zalet technologii jest jej elastyczność w modelowaniu właściwości otrzymywanych produktów. Oznacza to, że istnieje możliwość nadania określonych właściwości gotowego produktu, ukierunkowanych ściśle do konkretnego zastosowania. Proces wyciskania hydrostatycznego prowadzi się w środowisku medium wysokociśnieniowego. Poruszający się tłok spręża medium ciśnieniowe, powodując wzrost ciśnienia hydrostatycznego działającego na zanurzony w medium wsad. Przy pewnej, krytycznej wartości ciśnienia, charakterystycznej dla danego materiału, rozpoczyna się proces odkształcania plastycznego, a materiał zostaje poddany wyciskaniu niepodpartą powierzchnią narzędzia (otwór matrycy), ślizgając się po warstwie utworzonej z cieczy roboczej i środka smarującego nałożonego na wsad. Efektywność rozdrabniania ziaren za pomocą metody wyciskania hydrostatycznego została udokumentowana dla wielu metali oraz ich stopów. Struktury ultradrobnocienne bądź nanokrystaliczne uzyskiwano w aluminium i jego stopach, miedzi i jej stopach, tytanie, stali austenitycznej, niklu oraz innych materiałach [2–9]. Jedną z podstawowych zalet procesu HE jest hydrostatyczny stan naprężeń w strefie odkształcania plastycznego, co w połączeniu z ograniczeniem sił tarcia do minimum dzięki stosowaniu medium ciśnieniowego umożliwia stosowanie dużego stopnia odkształcenia w pojedynczej operacji wyciskania na poziomie odkształcenia rzeczywistego $\varepsilon \sim 2$. Stwarza to możliwość przeróbki plastycznej relatywnie dużych objętości materiału. Półprodukty w postaci prętów o długości powyżej jednego metra mogą być dalej kształtowane na gotowe wyroby przemysłowymi metodami wykorzystującymi obróbkę CNC.

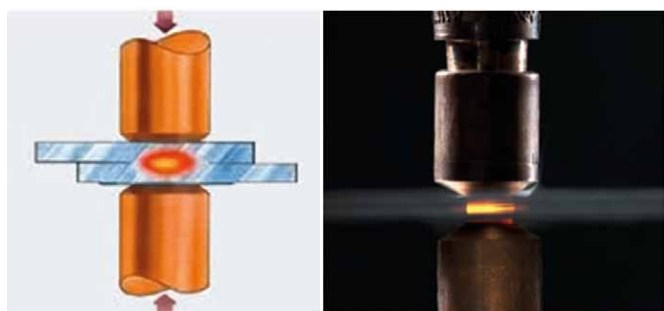
Przykładowe zastosowania materiałów po procesie HE

Jednym z przykładów efektywnego wykorzystania procesu wyciskania hydrostatycznego może być stal austenityczna 316L przeznaczona na elementy złączne.

Właściwości mechaniczne dotychczas oferowanych na świecie elementów złącznych ze stali austenitycznych osiągnęły swój maksymalny pułap, gdyż wykonuje się je tradycyjnymi metodami przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Zastosowanie wysokich ciśnień w procesie wyciskania hydrostatycznego umożliwia poddanie stali austenitycznej dużemu odkształceniu plastycznemu, bez pęknięć i defektów. Dużo większe odkształcenie niż w tradycyjnych metodach obróbki plastycznej, jak kucie, ciągnięcie czy walcowanie, można osiągnąć dzięki temu, iż wysokie ciśnienie uplastycznia materiały, przeciwdziałając powstawaniu pęknięć, a więc zwiększa odkształcenie do pęknięcia. Bez ciśnienia hydrostatycznego materiały pękają szybciej i wcześniej. Duże odkształcenie w stali powoduje silne rozdrobnienie mikrostruktury do wielkości ultradrobnociennej bądź nanometrycznej. Ponieważ wytrzymałość metali i stopów rośnie wraz z rozdrobnieniem ich mikrostruktury, wytrzymałości stali po wyciskaniu hydrostatycznym osiągają wyższe wartości niż te po odkształcaniu metodami tradycyjnymi. Na rys. 2 przedstawiono wpływ stopnia odkształcenia na zmianę właściwości mechanicznych stali 316L. Badania wyciskania hydrostatycznego na zimno stali austenitycznej 316L wykazały, że materiał umocniony odkształceniowo przewyższał wytrzymałością najlepsze stale oferowane na rynku o 10% (granice plastyczności o prawie 30%), a wydłużenie było wyższe od 2 do 4 razy [10]. Metodą kucia na zimno nie można uzyskać takich właściwości mechanicznych, jakie uzyskuje się poprzez silne utwardzanie na zimno przy zastosowaniu wyciskania hydrostatycznego. Związane jest z silnym rozdrobnieniem mikrostruktury materiału do poziomu nanometrycznego. Rys. 2 b przedstawia mikrostrukturę stali austenitycznej po procesie wyciskania hydrostatycznego z odkształceniem rzeczywistym $\varepsilon = 1.5$, gdzie obserwowano ziarna o wielkości $d \sim 50$ nm. Efektem silnego rozdrobnienia struktury jest także wciąż relatywnie



Rys. 3. Elementy złączne ze stali 316L po procesie wyciskania hydrostatycznego: a) szpilka dwustronna M20x128 (A4-100 DIN 976) o wytrzymałości $R_m = 1270$ MPa; b) śruba z łbem okrągłym M16x90 (A4-80 DIN 912) o wytrzymałości $R_m = 1150$ MPa; c) śruba z łbem sześciokątnym M20x10 (A4-100 DIN 931) o wytrzymałości $R_m = 1200$ MPa [10]



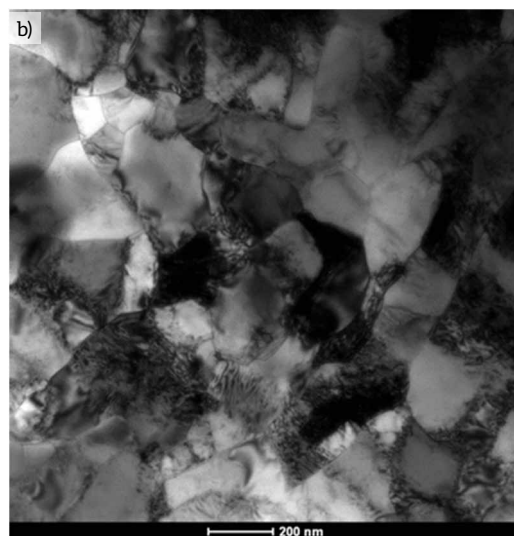
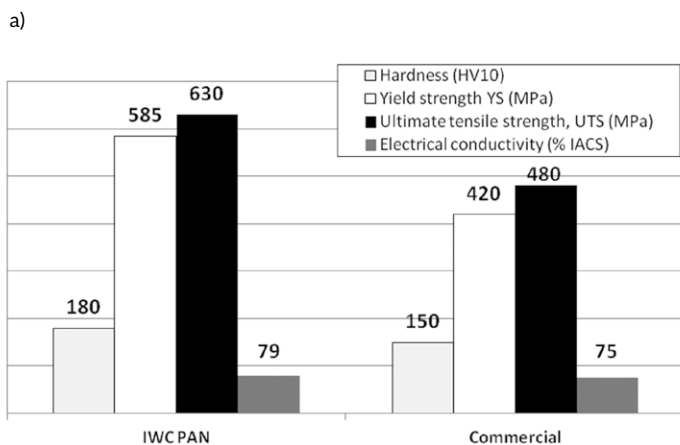
Rys. 4. Proces punktowego zgrzewania oporowego blach [18–19]

wysokie wydłużenie ϵ_f (prawa oś na rys. 2 a) na poziomie 15%, umożliwiające kształtowanie gotowych wyrobów. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe elementy złączne wykonane ze stali austenitycznej 316L, po procesie wyciskania hydrostatycznego będące już na etapie komercjalizacji.

Wykorzystanie tego typu elementów pozwala na znaczne oszczędności wagowe i materiałowe. Przykładowo standardową śrubę M8 można zastąpić śrubą M6 i uzyskać redukcję masy na poziomie 50%. Z drugiej strony stosowanie elementów o takich samych gabarytach umożliwia zwiększenie dopuszczalnych obciążeń konstrukcji.

Innym materiałem o silnym potencjale aplikacyjnym jest miedź stopowa z dodatkami cyrkonu i chromu, CuCrZr. Materiał ten jest powszechnie wykorzystywany na elektrody do procesu punktowego zgrzewania oporowego. Proces ten jest szeroko stosowany w przemyśle motoryzacyjnym do łączenia blach nadwoziowych. Proces schematycznie przedstawiono na rys. 4. Podczas łączenia blach następuje z dwóch stron chwilowy docisk nasadek elektrodowych z towarzyszącym mu przepływem prądu i nadtopieniem w strefie połączenia. Szacuje się, że w polskim przemyśle samochodowym przy wytwarzaniu karoserii samochodów rocznie wykonuje się ponad 1,8 miliarda zgrzein, głównie punktowych. W jednym pojeździe samochodowym zwykle występuje 4000–6000 zgrzein punktowych. Blisko 60% prac linii montażowej wykonują roboty, z czego większość stanowią procesy montażu karoserii oparte o procesy zgrzewania punktowego [11]. Konieczność wymiany zużywających się końcówek zgrzewających związana jest często z przestojami linii produkcyjnej.

Podstawowe właściwości końcówek do zgrzewania punktowego wpływające na ich odporność na zużycie to twardość oraz przewodność elektryczna. Na rys. 5 a przedstawiono porównanie twardości, przewodności elektrycznej oraz właściwości



Rys. 5. Porównanie właściwości mechanicznych, twardości oraz przewodności elektrycznej miedzi stopowej CuCrZr przerabianej plastycznie metodą wyciskania hydrostatycznego z materiałem komercyjnym stosowanym na elektrody; b) mikrostruktura miedzi stopowej CuCrZr po procesie wyciskania hydrostatycznego [12]

mechanicznych elektrody wytworzonej z materiału poddanego procesowi wyciskania hydrostatycznego w IWC PAN w porównaniu do materiału elektrody komercyjnej, powszechnie stosowanej w przemyśle. Materiał po procesie wyciskania hydrostatycznego charakteryzuje się ~20% wzrostem twardości oraz 30% wzrostem wytrzymałości w porównaniu do materiału komercyjnego przy nieznacznie lepszej także przewodności elektrycznej [12]. Materiał po procesie wyciskania hydrostatycznego charakteryzuje się silnie rozdrobioną mikrostrukturą o wielkości ziarna $d \sim 180$ nm.

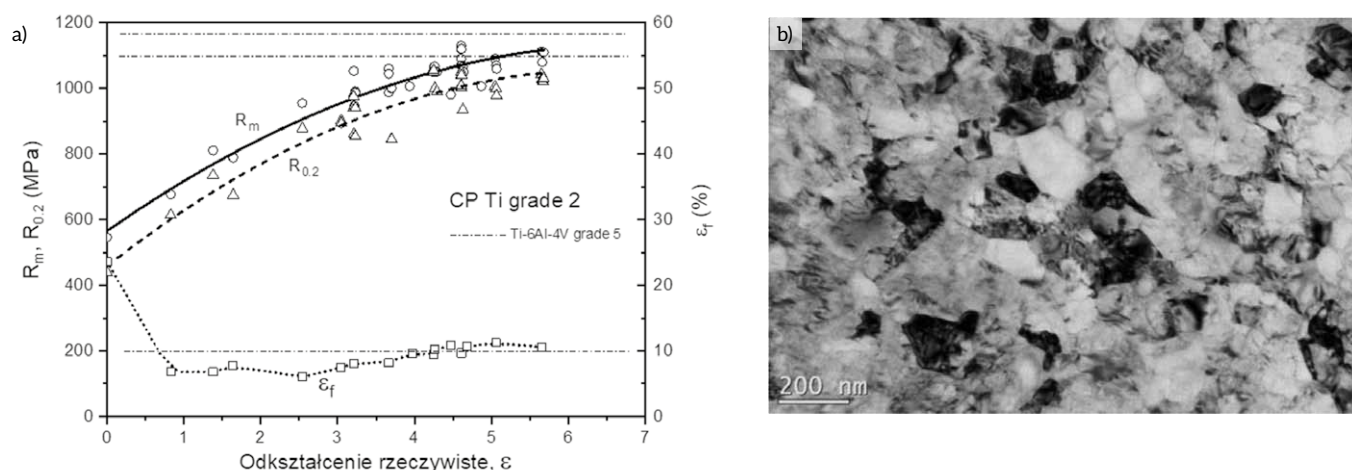
Testy żywotności elektrod wykonanych z materiału po procesie wyciskania hydrostatycznego wykazały przeszło 6-krotnie większą żywotność w porównaniu do materiału komercyjnego. Przy założonych wartościach siły nacisku oraz prądu elektrodą komercyjną wykonano 150 zgrzein blach ocynkowanych, podczas gdy elektroda z materiału IWC PAN uległa zużyciu po wykonaniu blisko 1000 zgrzein [12]. Na rys. 6 przedstawiono elektrody do procesu zgrzewania punktowego wykonane z miedzi stopowej CuCrZr po procesie wyciskania hydrostatycznego (wg normy DIN 44750).

Kolejnym przykładem silnego potencjału aplikacyjnego silnie rozdrobionych materiałów po procesie wyciskania hydrostatycznego jest tytan. Tytan o czystości handlowej, ze względu na niskie właściwości mechaniczne, jest w implantologii zastępowany stopem Ti-6Al-4V bądź stopem zawierającym



Rys. 6. Elektrody z miedzi stopowej CuCrZr przerabianej plastycznie metodą wyciskania hydrostatycznego [12]

niob. Wadą tych stopów są toksyczne dodatki stopowe stosowane po to, aby podnieść wytrzymałość. Zastosowanie tytanu o czystości handlowej pozwoliłoby na wyeliminowanie tego problemu pod warunkiem, że materiał miałby odpowiednio wysoką wytrzymałość. Wytrzymałość czystego tytanu można podnieść poprzez rozdrobienie jego mikrostruktury, stosując metody dużych odkształceń plastycznych. Na rys. 7 przedstawiono zmianę właściwości mechanicznych, wytrzymałości na

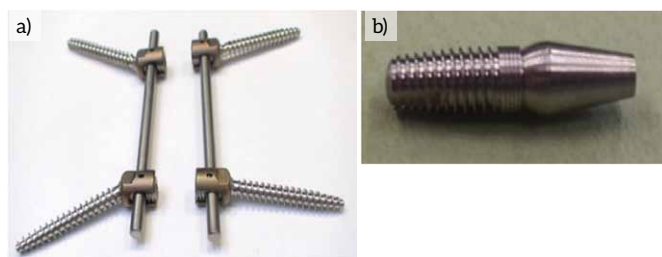


Rys. 7. Tytan po procesie wyciskania hydrostatycznego: a) wpływ odkształcenia rzeczywistego na właściwości mechaniczne w porównaniu do stopu Ti-6Al-4V; b) mikrostruktura [13]

rozciąganie, granicy plastyczności oraz wydłużenia ϵ_f (prawa oś) w funkcji odkształcenia plastycznego realizowanego w procesie wyciskania hydrostatycznego.

Po procesie wyciskania z łącznym odkształceniem rzeczywistym $\epsilon \sim 5$ wytrzymałość tytanu rośnie blisko dwukrotnie do wartości $R_m \sim 1100$ MPa, osiągając poziom komercyjnego stopu Ti-6Al-4V (~ 1170 MPa) [13]. Tak silny wzrost właściwości mechanicznych związany jest z rozdrobnieniem mikrostruktury do poziomu manometrycznego (rys. 7 b), gdzie obserwowano ziarna o wielkości $d \sim 80$ nm. Na rys. 8 przedstawiono prototypowe implanty medyczne wykonane z nanokrystalicznego tytanu po procesie wyciskania hydrostatycznego [13].

Proces wyciskania hydrostatycznego jest uniwersalną metodą przeróbki plastycznej, umożliwiającą nadawanie unikalnych właściwości praktycznie wszystkim metalom i stopom metali. Opracowywanych jest na bieżąco szereg innych rozwiązań, mających na celu wytwarzanie prototypów materiałów mogących z powodzeniem znaleźć zastosowanie w przemyśle. Ze względu na unikalne połączenie niskiej gęstości i stosunkowo wysokiej wytrzymałości duża część badań poświęcona jest szerokiemu spektrum stopów aluminium [3–5, 14]. Oprócz metali i stopów metali obróbce plastycznej można poddawać także inne materiały, jak np. tworzywa sztuczne czy kompozyty [15].




Rys. 8. Prototypowe implanty medyczne z nanokrystalicznego tytanu po procesie wyciskania hydrostatycznego: a) stabilizator kręgosłupa (pręty z nanotytanu); b) implant dentystyczny [13]

Poza właściwościami mechanicznymi proces silnej deformacji wywiera także silny wpływ na inne właściwości, znacznie poszerzając możliwości praktycznego wykorzystania wyciskanych materiałów, jak np. właściwości magnetyczne, termoficzne, korozyjne czy nadprzewodnictwo [15–17].

Literatura

- [1] Hall. O.E., Proc. Phys. Soc., B64, 1951, p. 747.
- [2] Petch N.J., J. Iron Steel Inst., 174, 1953, p. 25.
- [3] OLEJNIK L., KULCZYK M., PACHLA W., ROSOCHOWSKI A.: *Hydrostatic extrusion of UFG aluminium*. International Journal of Material Forming, 2(SUPPL. 1)/2009, pp. 621–624.
- [4] WIŚNIEWSKA-WEJNERT H., LESHHCHYNSKY V., BOROWSKI J., LEWANDOWSKA M., KULCZYK M., PACHLA W.: *Deformation behaviour of 2017 nanostructured aluminium Alloy*. „Inżynieria Materiałowa” 6/2012.
- [5] KULCZYK M., SKIBA J., PACHLA W.: *Microstructure and mechanical properties of AA5483 treated by a combination of ECAP and hydrostatic extrusion*, Archives of Metallurgy and Materials, 59/2014, pp. 163–166.
- [6] KULCZYK M., PACHLA W., MAZUR A., SUŚ-RYSZKOWSKA M., KRASILNIKOV N., KURZYDŁOWSKI K.J.: *Producing bulk nanocrystalline materials by combined hydrostatic extrusion and equal-channel angular pressing*. Materials Science – Poland, 25(4)/2007, pp. 991–999.
- [7] KULCZYK M., ZYSK B., LEWANDOWSKA M., KURZYDŁOWSKI K.J.: *Grain refinement in CuCrZr by SPD processing*, Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science, 207(5)/2010, pp. 1136–1138.
- [8] KULCZYK M., SKIBA J., PRZYBYSZ S., PACHLA W., BAZARNIK P., LEWANDOWSKA M.: *High strength silicon bronze (C65500) obtained by hydrostatic extrusion*, Archives of Metallurgy and Materials, 57(3)/2012, pp. 859–862.
- [9] PACHLA W., KULCZYK M., SUŚ-RYSZKOWSKA M., MAZUR A., KURZYDŁOWSKI K.J.: *Nanocrystalline titanium produced by hydrostatic extrusion*, Journal of Materials Processing Technology, 205(1–3)/2008, pp. 173–182.

- [10] PACHLA W., SKIBA J., KULCZYK M., PRZYBYSZ S., PRZYBYSZ M., WRÓBLEWSKA M., DIDUSZKO R., STĘPNIAK R., BAJOREK J., RADOMSKI M., FAFAWA W.: *Nanostructuring of 316L type austenitic stainless steels by hydrostatic extrusion*, Materials Science and Engineering: A, 615/2014, pp. 116–127.
- [11] <http://www.controlengineering.pl>.
- [12] KULCZYK M., PACHLA W., GODEK J., SMALC-KOZIOROWSKA J., SKIBA J., PRZYBYSZ S., WRÓBLEWSKA M., PRZYBYSZ M.: *Improved compromise between the electrical conductivity and hardness of thermo-mechanically treated CuCrZr alloy*, Materials Science and Engineering: A, w recenzji.
- [13] PACHLA W., KULCZYK M., PRZYBYSZ S., SKIBA J., WOJCIECHOWSKI K., PRZYBYSZ M., TOPOLSKI K., SOBOLEWSKI A., CHARKIEWICZ M.: *Effect of severe plastic deformation realized by hydrostatic extrusion and rotary swaging on the properties of CP Ti grade 2*, Journal of Materials Processing Technology, 221/2015, pp. 255–268.
- [14] CHROMIŃSKI W., KULCZYK M., LEWANDOWSKA M., KURZYDŁOWSKI K.J.: *Precipitation strengthening of ultrafinegrained Al-Mg-Si alloy processed by Hydrostatic extrusion*, Materials Science and Engineering: A, 609/2014, pp. 80–87.
- [15] KASZUWARA W., KULCZYK M., LEONOWICZ M., GIŻYŃSKI T., MICHALSKI B.: *Densification of Nd-Fe-B Powders by Hydrostatic Extrusion Magnetics*, IEEE Transactions, 2014, Vol. 50, issue 10, 10.1109/TMAG.2014.2317152 (IF=1,301 5-YIF, MNiSW=25, lista A).
- [16] SKIBA J., DOMINIAK A., WIŚNIEWSKI T.S., PACHLA W., KULCZYK M., PRZYBYSZ S.: *Influence of severe plastic deformation induced by HE and ECAP on the thermo-physical properties of metals*, Key Engineering Materials, 641/2015, pp. 278–285.
- [17] KOVÁČ P., HUŠEK I., PACHLA W., KULCZYK M., MELIŠEK T., DVORÁK T.: *As-deformed filament's density and transport currents of MgB₂/Ti/Gliscop wire*, Journal of Alloys and Compounds 509(35)/2011, pp. 8783–8787.
- [18] <http://weld.com.pl/guide/zgrzewanie-oporowe-punktowe>.
- [19] <https://www.aspa.pl/zgrzewanie-garbowe/>.

 Mariusz Kulczyk

Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk, IWC PAN
e-mail: mariusz@unipress.waw.pl

artykuł recenzowany

reklama

reklama