



Wpływ geometrii narzędzia na rozdrobnienie ziarna stopu CuZn37 w procesie powtarzalnej obróbki plastycznej

Influence of the forming tool parameters on the grain refinement of brass by SPD process

(1) Stanislav Rusz^{1*}, (2) Michal Salajka¹, (3) Ondrej Hilser¹, (4) Jan Dutkiewicz², (5) Josef Boruta¹,
(6) Jiri Švec¹

¹ VŠB – Technical University of Ostrava, 17. listopadu 15, Ostrava – Poruba, Czechia

² Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, ul. W. Reymonta 25, 30-059 Kraków, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 10.10.2016

Recenzja: 2.11.2016

Akceptacja: 16.12.2016

Wkład autorów

- (1) Koncepcja i przygotowanie manuskryptu
- (2) Prowadzenie prac badawczych oraz opracowanie wyników
- (3) Prowadzenie prac badawczych oraz opracowanie wyników
- (4) Przeprowadzenie analizy strukturalnej
- (5) Przeprowadzenie konsultacji do osiągniętych wyników eksperymentów
- (6) Prowadzenie prac badawczych

Streszczenie

Rozwój technologii produkcji materiałów ultra drobnoziarnistych jest obecnie bardzo intensywnie przyspieszany. Na VŠB – Uniwersytecie Technicznym w Ostrawie opracowano metodę, która wykorzystuje zasadę powtarzalnej obróbki plastycznej w celu rozdrobnienia struktury i poprawy właściwości mechanicznych taśm blachy metalowej. Największe praktyczne znaczenie ma wzrost umownej granicy plastyczności oraz granicy wytrzymałości taśm blachy metalowej. Nowo opracowaną metodę stanowi wyciskanie równokanałowe podwójnymi rollkami (DRECE). Powtarzalna obróbka plastyczna (SPD) skutkuje wysokim stopniem przetworzenia materiału. Metodę tę można stosować do produkcji materiałów metalicznych o bardzo drobnoziarnistej strukturze (dalej zwanej strukturą ultradrobnoziarnistą). Proces kształtowania jest oparty na technologii wyciskania z zerową redukcją grubości taśmy blachy z końcowym celem osiągnięcia wysokiego stopnia odkształcenia w formowanym materiale, co skutkuje znaczną poprawą własności mechanicznych materiału wejściowego. W niniejszym artykule przeanalizowano wpływ wartości kątów nowo opracowanych narzędzi kształtujących na osiągnięcie własności mechanicznych w wybranym materiale, mianowicie mosiądzu, w procesie SPD. Sprawdzone doświadczalnie następujące rodzaje materiałów: taśma blachy o wymiarach: 58 mm (szerokość) x 1000 mm (długość) x 2 mm (grubość). W pracy oceniono również wpływ powtarzalnej obróbki plastycznej (SPD) na umocnienie tych materiałów przy różnych wartościach kąta narzędzia kształtującego. Wykazano jednoznacznie wpływ nowych geometrii narzędzi kształtujących na poprawę własności mechanicznych.

Słowa kluczowe: powtarzalna obróbka plastyczna, metoda DRECE, mosiądz, własności mechaniczne, twardość, struktura

Article info

Received: 10.10.2016

Reviewed: 2.11.2016

Accepted: 16.12.2016

Authors' contribution

- (1) Author of the concept, editorship of paper
- (2) Carrying out experimental work and evaluation of results

Abstract

Development of technologies for the production of very fine-grained materials is currently very intensively accelerated. On VSB - Technical University of Ostrava developed a method that uses the principle of severe plastic deformation to refine the structure and enhance mechanical properties of sheet metal strips. The greatest importance in practice represents an increase in proof stress and tensile stress of sheet metal strips. Dual Rolls Equal Channel Extrusion (DRECE) method is a newly developed method. Severe plastic deformation results in a high degree of the material reformation. The method can be used to produce metallic materials with a very fine grain structure (hereinafter referred to as ultrafine grain structure). The forming process is based on extrusion technology with zero removal of the sheet strip thickness with the ultimate aim of achieving a high degree of deformation in the formed material, resulting in a significant improvement of mechanical properties in the input material. The paper ana-

* Autor do korespondencji. Tel.: +420 597 323 315; e-mail: stanislav.rusz@vsb.cz

* Corresponding author. Tel.: +420 597 323 315; e-mail: stanislav.rusz@vsb.cz

- (3) Carrying out experimental work and evaluation of results
- (4) Carrying out structural analysis
- (5) Consultations to the achieved results of experiments
- (6) Carrying out experimental work

lyses the effects of the values of angles of the newly developed forming tools on the achievement of mechanical properties in selected materials Cu and brass in the SPD process. The following types materials were verified experimentally – strip sheet with dimensions 58 (width) x 2 (thickness) x 1000 (length) mm. The paper also evaluates the influence of severe plastic deformation (SPD) on strengthening these materials at different values of the angle in the forming tool. The influence of new geometries of forming tools for improving mechanical properties has been unequivocally demonstrated.

Keywords: Severe Plastic Deformation process, DRECE method, brass, mechanical properties, hardness, structure

1. WSTĘP

W wielu technicznych procesach formowania odkształcenie jest znacznie większe, niż w warunkach próby rozciągania. W związku z tym, już od dawna przy badaniu zachowania umacniającego oraz kształtowania się struktury materiału, stosowane są próby na skręcanie. Te nowe przedsięwzięcia wykazały na początku lat dziewięćdziesiątych, że możliwe jest wytwarzanie materiałów metalicznych nanokrystalicznych poprzez silne odkształcenie plastyczne w niskich temperaturach homologicznych [1, 2, 4, 9]. Możliwe jest otrzymanie ciągliwych materiałów metalicznych, które w próbie rozciągania osiągają odkształcenie w granicach 30% do 70%. W próbie na skręcanie możliwe jest osiągnięcie na tych samych materiałach kilkuset procentowego odkształcenia. Uzyskiwanie struktur nanokrystalicznych wymaga typowych wartości odkształcenia rzędu od 100 do 1000%. Silne odkształcenia przy stosunkowo niskich temperaturach homologicznych to skuteczna metoda wytwarzania materiałów o strukturze ultradrobnosiarnistej (UFG). Nowe technologie, które wykorzystują silne odkształcenie dla uzyskania struktury drobnosiarnistej, opisywane są przez następujących autorów [1, 2]. Dane badania dotyczyły całej produkcji materiałów UFG, z zastosowaniem technologii powtarzalnej obróbki plastycznej (SPD). Te nowe technologie do produkcji półfabrykatów o strukturze ultradrobnosiarnistej różnią się od tradycyjnych technologii. Podczas gdy w klasycznych technologiach występuje zmiana przekroju poprzecznego obrabianego materiału, przekrój poprzeczny materiału przetwarzanego technologią SPD pozostaje niezmienny. Liczne rodzaje technologii SPD służących do produkcji metali UFG opira-

1. INTRODUCTION

In many technical processes of forming the deformation is substantially greater than conditions at the tensile test. In this case a torsion tests have already been used for a long time at investigation of strengthening behavior and development of material structure. These new activities demonstrated at the beginning of the nineties, that it is possible to manufacture nanocrystalline metallic materials by high plastic deformation at low homological temperatures [1, 2, 4, 9]. It is possible to achieve on ductile metallic materials at the tensile test a deformation from 30% to 70%. At the torsion test it is possible to achieve on the same materials several hundred percent. Obtaining of nano-crystalline structures requires typical magnitudes of deformation of the order from 100 to 1000%. High deformation at comparatively low homological temperatures is an efficient method for manufacture of ultrafine grained (UFG) massive materials. News technologies, which use high deformation for obtaining of fine-grained structure, comprise namely the following authors [1, 2]. This research concerned the whole production of UFG materials, using Severe Plastic Deformation (SPD). These new technologies for production of semi-finished products with ultrafine grained structure differ from conventional technologies. While in classical technologies change cross-section of the processed material, the cross-section of material processes by SPD remains unchanged. Several types of SPD technologies serving for production of UFG metals was developed already at the beginning of the nineties. One of them is new type of equipment DRECE (Dual Rolls Equal Channel Extrusion), designated for obtaining UFG struc-

cowano już na początku lat dziewięćdziesiątych. Jedną z nich jest nowy typ urządzeń DRECE (*Dual Rolls Equal Channel Extrusion*), przewidzianych do uzyskiwania struktury UFG w taśmie blachy [3, 5]. Na podstawie wcześniej opublikowanych prac, czynnikiem decydującym o zwiększeniu właściwości mechanicznych taśm z blachy metalowej z zastosowaniem procesu SPD (*Sever Plastic Deformation*) jest uzyskanie optymalnego kąta „formowania” w obszarze plastycznym, który jest określony przez układ konstrukcyjny narzędzi formujących [6, 7]. Artykuł analizuje wpływ wielkości trzech kątów „formowania” (123° , 118° i 108°) na zmianę właściwości mechanicznych i osiąganą strukturę.

1.1. Podstawowe technologie wytwarzania materiałów UFG

Najczęściej używane, a także nowo opracowywane metody produkcji materiałów UFG, obejmują następujące technologie [7, 8]:

- skręcanie wysokociśnieniowe,
- wielokrotne równokanałowe wyciskanie kątowe (ECAE),
- cykliczne matrycowe wyciskanie kanałowe (CCDC),
- cykliczne wyciskanie ściskające (CEC),
- formowanie przez wyciskanie ciągle (CEF),
- walcowania kumulacyjne ze spajaniem (ARB),
- ograniczone prasowanie bruzdowe (CGP),
- kucie tiksotropowe,
- HPT – intensywne skręcanie pod wysokim ciśnieniem,
- metoda DRECE.

1.2. Metoda DRECE

Urządzenia DRECE oparte jest na procesie CONFORM zmodyfikowanym do kształtowania blachy. W roku 2009 prototyp tego urządzenia został oddany do eksploatacji próbnej w laboratoriach VŠB - Uniwersytecie Technicznym w Ostrawie (patrz rys. 1, który przedstawia zasadę działania i widok ogólny prototypu tego urządzenia). Składa się ono z następujących głównych części: przekładnia typu Nord z napędem elektrycznym, sprzęgło tarczowe, rolki wprowadzającej oraz rolek dociskowych z regu-

ture in strip of sheet [3, 5]. From the previously published papers, the determining factor for increasing the mechanical properties of the strips of metal sheet with the use of the SPD process (*Severe Plastic Deformation*) is to achieve an optimal “forming” angle in the plastic region, which is given by the design arrangement of the forming tools [6, 7]. The paper analyses the influence of the size of three dimensions of the “forming” angles (123° , 118° and 108°) on the change of the mechanical properties and achieved structure.

1.1. Basic manufacturing technologies of UFG materials

Most frequently used and new developing methods for production of UFG materials comprise the following technologies [7,8]:

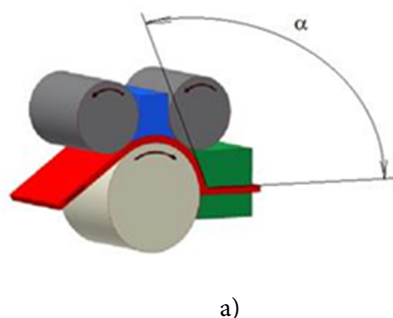
- High Pressure Torsion,
- Equal Channel Angle Extrusion,
- Cyclic Channel Die Compression,
- Cyclic Extrusion Compression,
- Continuous Extrusion Forming,
- Accumulative Roll Bonding,
- Constrained Groove Pressing,
- Thixoforging,
- HPT – High Pressure Torsion,
- DRECE method,

1.2. DRECE Method

Equipment DRECE is based on the CONFORM process modified for sheet forming. During 2009 a prototype of this equipment was put into trial operation at the working site of the VŠB-Technical University of Ostrava (see Fig. 1, which shows a principle and overall view of the prototype of this equipment). It consists of the following main parts: gear of the type Nord with electric drive, disc clutch, feed roller and pressure rollers with the regulation of thrust, forming tool made of the steel grade Dievar. A strip

lacją nacisku, narzędzie kształtujące wykonane z gatunku stali Dievar. Taśma blachy o wymiarach 58 x 2 x (1000–2000) mm, jest doprowadzany do przestrzeni roboczej i jest wyciskany przez rolkę wprowadzającą przy pomocy rolek dociskowych poprzez narzędzie kształtujące bez zmiany jego przekroju. Następny przepust jest realizowany identycznym sposobem. Wielokrotne odkształcenie plastyczne realizowane w ten sposób skutkuje znaczącym rozdrobnieniem struktury. Podczas próbnego ruchu urządzenia, po pierwszych doświadczeniach dokonano analiz metalograficznych. Na podstawie tych prac zaproponowano pewne modyfikacje w konstrukcji narzędzi formujących. Nie ma możliwości opublikowania bardziej szczegółowych danych technicznych, gdyż to urządzenie jest chronione patentem [6, 8].

of the sheet with dimensions 58 x 2 x (1000–2000) mm is fed into the working space and it is pushed by the feed roller with help of pressure rollers through the forming tool without change of its cross section. Next pass is realised after rotation of the sheet by 180°. Repeated plastic deformation realised in this manner brings substantial refinement of the structure. During the trial operation, first experiments were made followed by their evaluation. On the basis of these works some modifications of the design were proposed. It is not possible to publish more detailed technical data as this equipment is patent protected [6, 8].



Rys. 1. a) Zasada procesu DRECE, b) Urządzenie formujące
Fig. 1. a) Principle of DRECE process, b) Forming equipment

2. DOŚWIADCZENIA

Doświadczenia z wykorzystaniem uformowanego materiału konstrukcyjnego – mosiądzu, przeprowadzone zostały na urządzeniach DRECE w celu osiągnięcia rozdrobnienia struktury ziarnowej w taśmie blachy o wymiarach 58 x 2 x 1000 mm (mosiądz Cu-Zn 65/37% wagowych). Łącznie wykonano 6 przepustów przez narzędzie DRECE. Następnie, wyciśnięte próbki mosiądzu po wszystkich przepustach zostały pocięte z blachy na poszczególne serie do wykonania pojedynczych próbek do badań metalograficznych i wytrzymałościowych. [6].

2. EXPERIMENTS

Experiments with the use of the formed structural material – brass were made on the DRECE machines in order to achieve grain refinement in the strip of the sheet with dimensions 58 x 2 x 1000 mm (brass Cu-Zn 65/37 weight %). Altogether 6 passes were made through the DRECE tool. The extruded samples of brass after all passes were then cut from sheets into individual series for the manufacture of individual testing specimens for metallographic evaluation and mechanical tests. [6].

2.1. Wyniki doświadczeń przy kącie kształtowania $\alpha = 123^\circ$

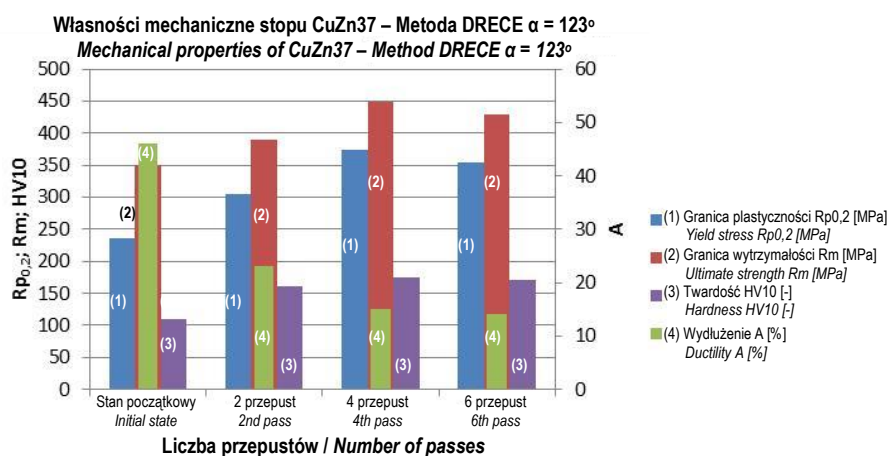
Przy kącie odkształcania $\alpha = 123^\circ$ uzyskaliśmy następujące wyniki własności mechanicznych (patrz rab. 1). Rys. 2 przedstawia graficzną prezentację wpływu liczby przepustów przez narzędzie formujące na zmianę wielkości granicy plastyczności $R_{p0,2}$, granicy wytrzymałości R_m , wydłużenia A i twardości HV10.

2.1. Experimental results at forming angle $\alpha = 123^\circ$

At the forming angle $\alpha = 123^\circ$ we obtained the following results of mechanical properties (see Tab. 1). Fig. 2 show a graphical representation of the influence of the number of passes through the forming tool to change the magnitude of the yield strength $R_{p0,2}$, ultimate strength R_m , ductility A and hardness HV10.

Tab. 1. Wpływ liczby przepustów na własności mechaniczne stopu CuZn37
Tab. 1 Influence of the number of passes on mechanical properties CuZn37alloy

	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa] Yield stress $R_{p0,2}$ [MPa]	Granica wytrzymałości R_m [MPa] Ultimate strength R_m [MPa]	Wydłużenie A [%] Ductility A [%]	Twardość HV10 [-] Hardness HV10 [-]
Stan początkowy Initial state	235	350	46	110
2 przepust 2 nd pass	305	390	23	160
4 przepust 4 th pass	375	450	15	175
6 przepust 6 th pass	355	430	14	171



Rys. 2. Wpływ liczby przepustów na własności mechaniczne – podsumowanie

Fig. 2. Effect of the number of passes on the mechanical properties – summary

2.1.1. Dyskusja na temat uzyskanych wyników

Przy ocenie wpływu liczby przepustów na właściwości mechaniczne w przypadku metody DRECE, istotnym kryterium jest osiągnięcie największego możliwego umocnienia wyciskanego materiału przy minimalnej liczbie przepustów przez narzędzie formujące. Ocena dotyczy zmiany wartości granicy plastyczności $R_{p0,2}$, która jednak powoduje pogorszenie właściwości plastycznych (t.j. wydłużenia A). Chce-

2.1.1. Comments on the achieved results

When evaluating the impact of the number of passes on the mechanical properties in case of the DRECE method, an essential criterion is the achievement of the greatest possible reinforcement of the formed material with a minimum number of passes through the forming tool. The evaluation concerns the change of magnitude of the yield strength $R_{p0,2}$ which, however, causes a deterioration of plastic properties (i.e. of the

my osiągnąć, przy wykorzystaniu tego procesu kształtowania, maksymalną dopuszczalną wielkość granicy plastyczności przy zachowaniu plastyczności umożliwiającą wykonywanie następnych operacji formowania (jak na przykład formowanie umocnionej taśmy blachy do pewnego rodzaju profilu). Kolejnym monitorowanym parametrem jest przewodność elektryczna i cieplna, które zmienia się podczas rozdrobnienia ziarna. Przy zastosowaniu kąta $\alpha = 123^\circ$ w strefie odkształcania, po drugim przepuszczeniu przez narzędzie formujące, występuje 30% wzrost wartości $R_{p0,2}$ oraz 23% zmniejszenie wydłużenia A w odniesieniu do stanu początkowego stopu. Po czwartym przepuszczeniu, ma miejsce 23% wzrost wartości $R_{p0,2}$ jak również 8% spadek wydłużenia A – w stosunku do drugiego przepustu przez narzędzie do formowania. Ogólny wzrost granicy plastyczności $R_{p0,2}$ po 4 przepuszczeniu wynosił 59% w stosunku do stanu początkowego. W przeciwieństwie do tego, wartość wydłużenia po czwartym przepuszczeniu zmniejszyła się o 31% w stosunku do stanu wyjściowego.

W poniższych doświadczeniach zmieniono kąt α w strefie odkształcania na 118° i 108° , w celu osiągnięcia wyższego umocnienia – granicy plastyczności $R_{p0,2}$ już po pierwszym przejściu przez narzędzie do formowania, przy zachowaniu racjonalnej wielkości obniżenia wydłużenia A. Uzyskany wzrost twardości pozostaje w związku ze wzrostem granicy plastyczności $R_{p0,2}$ po drugim i czwartym przejściu przez narzędzie formujące w stosunku do stanu początkowego (patrz tab. 2 i tab. 3).

2.2. Wyniki doświadczeń przy kącie formowania $\alpha = 108^\circ$ i 118°

ductility A). We want to achieve with the use of the forming process the maximum possible magnitude of the yield strength while preserving the plasticity enabling execution of the next forming operations (such as forming the reinforced strip of the sheet into a certain type of profile). Another monitored parameter is an electrical and thermal conductivity, which increases during grain refinement. When using an angle $\alpha = 123^\circ$ in the zone of deformation, after the second pass through the forming tool a 30% increase in the value $R_{p0,2}$ and 23% reduction in ductility A took place in respect to the initial state of the alloy. After the fourth pass, a 23% increase in the value $R_{p0,2}$ took place, as well as 8% decrease in ductility A with respect to the second pass through the forming tool. The overall increase in yield strength $R_{p0,2}$ after 4 passes was 59% with respect to the initial state. In contrast, the value of the ductility after the fourth passes decreased by 31% with respect to the initial state.

In the following experiments, the angle α in the zone of deformation was changed to 118° and 108° in order to achieve higher reinforcement – yield strength $R_{p0,2}$ already after the first pass through the forming tool while preserving a reasonable magnitude of reduction of the ductility A. The achieved increase in hardness is in relation to the increase in yield strength $R_{p0,2}$ after the second and fourth passes through the forming tool with respect to the initial state (see Tab. 2 and Tab. 3).

2.2. Experimental results at forming angle $\alpha = 108^\circ$ and 118°

Tab. 2. Wpływ nowej geometrii narzędzia formującego na własności mechaniczne stopu CuZn37 – kąt odkształcania $\alpha = 118^\circ$

Tab. 2. Influence of new geometry of forming tools on mechanical properties of CuZn37 alloy – forming angle $\alpha = 118^\circ$

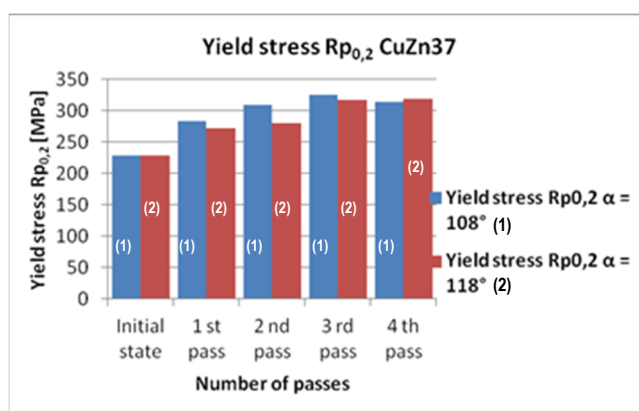
	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa] <i>Yield stress $R_{p0,2}$ [MPa]</i>	Granica wytrzymałości R_m [MPa] <i>Ultimate strength R_m [MPa]</i>	Wydłużenie A [%] <i>Ductility A [%]</i>	Twardość HV10 [-] <i>Hardness HV10 [-]</i>
Stan początkowy <i>Initial state</i>	229	352	38,7	105
1 przepust <i>1st pass</i>	273	367	16,7	157
2 przepust <i>2nd pass</i>	280	413	16,2	160

	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa] Yield stress $R_{p0,2}$ [MPa]	Granica wytrzymałości R_m [MPa] Ultimate strength R_m [MPa]	Wydłużenie A [%] Ductility A [%]	Twardość HV10 [-] Hardness HV10 [-]
3 przepust 3 rd pass	318	466	10,3	173
4 przepust 4 th pass	320	467	10	175

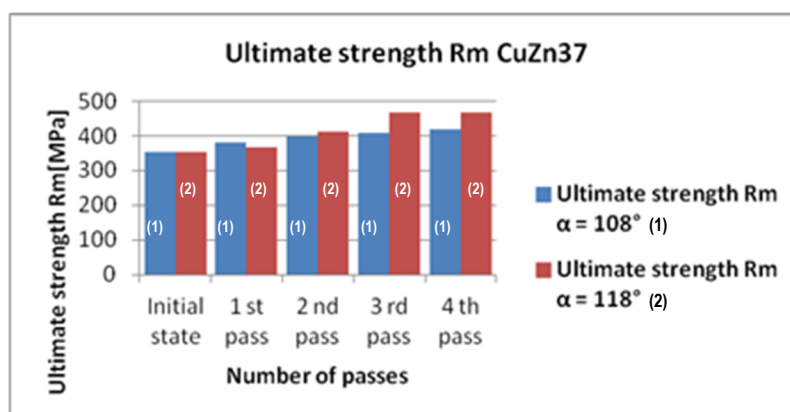
Tab. 3. Wpływ nowej geometrii narzędzia kształtującego na właściwości mechaniczne stopu CuZn37 – kąt odkształcania $\alpha = 108^\circ$

Tab. 3. Influence of new geometry of forming tools on mechanical properties of CuZn37 alloy – forming angle $\alpha = 108^\circ$

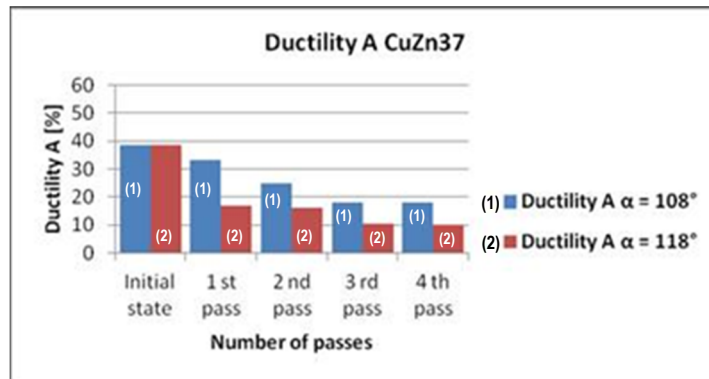
	Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa] Yield stress $R_{p0,2}$ [MPa]	Granica wytrzymałości R_m [MPa] Ultimate strength R_m [MPa]	Wydłużenie A [%] Ductility A [%]	Twardość HV10 [-] Hardness HV10 [-]
Stan początkowy Initial state	229	352	38,7	105
1 przepust 1 st pass	284	381	33,3	155
2 przepust 2 nd pass	309	398	24,7	159
3 przepust 3 rd pass	326	407	18	167
4 przepust 4 th pass	314	419	18	174



Rys. 3. Porównanie osiągniętych wielkości $R_{p0,2}$ po poszczególnych przepustach i z różnymi kątami
Fig. 3. Comparison of the achieved magnitudes of $R_{p0,2}$ after individual passages and different angles

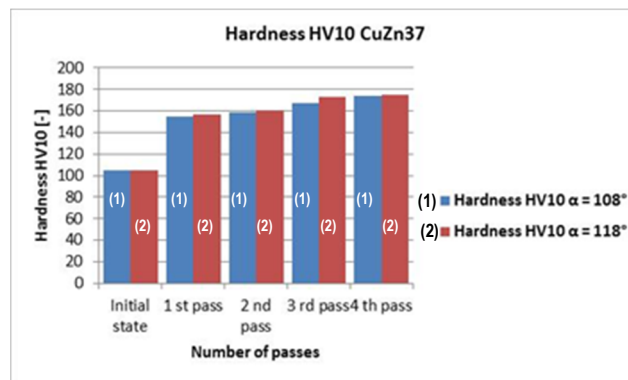


Rys. 4. Porównanie osiągniętych wielkości R_m po poszczególnych przepustach i z różnymi kątami
Fig. 4. Comparison of the achieved magnitudes of R_m after individual passes and different angles



Rys. 5. Porównanie osiągniętych wielkości wydłużenia A po poszczególnych przepustach z różnymi kątami

Fig. 5. Comparison of the achieved magnitudes of ductility A after individual passes and different angles



Rys. 6. Porównanie osiągniętych wielkości twardości HV10 po poszczególnych przepustach i z różnymi kątami

Fig. 6. Comparison of the achieved magnitudes of hardness HV10 after individual passes and different angles

2.2.1. Dyskusja na temat uzyskanych wyników

Przy zastosowaniu kąta odkształcania $\alpha = 118^\circ$, granica plastyczności $R_{p0,2}$ wzrosła o 19% już po pierwszym przepuszczeniu przez narzędzie formujące, natomiast po 2 przepuszczeniu wzrosła ona o 23% w porównaniu ze stanem początkowym (patrz rys. 3). Wartość wydłużenia zmniejszyła się po 1 przepuszczeniu o 22% do 16,7% w porównaniu do stanu początkowego (patrz rys. 5). Wydłużenie zmniejszyło się po drugim przepuszczeniu o 0,5%, do wartości 16,2%, która nadal umożliwiała kolejne operacje formowania.

Maksymalny wzrost $R_{p0,2} = 320$ MPa osiągnięto po czwartym przepuszczeniu przez narzędzie formujące (patrz rys. 3). Uzyskana wielkość nie różni się od wartości uzyskanej po trzecim przepuszczeniu. Tym niemniej, po trzecim i czwartym przepuszczeniu, wystąpiło znaczące zmniejszenie wydłużenia $A = 10.3\%$ (lub 10%) (patrz rys. 5). Wpływ liczby przejść przez urządzenie formujące na wzrost granicy wytrzymałości R_m pokazano na rys. 4. Wpływ liczby przejść przez na-

2.2.1. Comments on the achieved results

When an angle $\alpha = 118^\circ$ was used, the yield strength $R_{p0,2}$ increased by 19% already after the first pass through the forming tool, and after the 2nd pass, it increased by 23% in comparison with the initial state (see Fig.3). The ductility value decreased after the 1st pass by 22% to 16.7% in comparison with the initial state (see Fig. 5). Ductility decreased after the second pass by 0.5% to the value of 16.2%, which still enabled subsequent forming operations.

The maximum increase of $R_{p0,2} = 320$ MPa was achieved after the fourth pass through the forming tool (see Fig. 3). The achieved magnitude does not differ from the value obtained after the third pass. After the third and fourth passes, however, a substantial reduction in ductility $A = 10.3\%$ (or 10%) takes place (see Fig. 5). Effect of number of passes forming machine to increase of ultimate strength R_m is shown in Fig. 4. Effect of number of passes through a forming machine to increase the hardness is shown in Fig. 6.

rzędzie formujące na wzrost twardości pokazano na rys. 6. Wyniki te są skorelowane ze wzrostem własności mechanicznych. Z punktu widzenia osiągnięcia niezbędnego umocnienia stopu CuZn37 przy jednoczesnym zachowaniu niezbędnej ciągliwości wykazano, że dwa przejścia przez narzędzia do formowania mogą być uważane za wystarczające, w rozumieniu powyższych kryteriów, jak również z punktu widzenia potrzeb praktyki przemysłowej.

Przy zastosowaniu kąta odkształcania $\alpha = 108^\circ$, granica plastyczności $R_{p0,2}$ wzrosła o 24% już po pierwszym przepuszczeniu przez narzędzie formujące, natomiast po 2 przepuszczeniach, wzrosła ona o 35% w porównaniu ze stanem początkowym (patrz rys. 3). Wpływ liczby przejść przez urządzenie formujące na wzrost granicy wytrzymałości R_m pokazano na rys. 4. Wartość wydłużenia zmniejszyła się po 1 przepuszczeniu o 5% w porównaniu do stanu początkowego. Wydłużenie zmniejszyło się po drugim przepuszczeniu o 8,5% do możliwej do przyjęcia wartości 24,7%, umożliwiającej kolejne operacje formowania. Stwierdzono, że zarówno po drugim, jak i trzecim przepuszczeniu przez narzędzie do formowania uzyskano wyższe umocnienie niż przy zastosowaniu kąta $\alpha = 118^\circ$, co jest zgodne z opublikowanymi danymi teoretycznymi (patrz rys. 3). Znaczącym nowym odkryciem jest osiągnięcie zadowalającej wartości wydłużenia A już po pierwszym i drugim przejściu – czyli 33,3 i 24,7% (patrz rys. 5). Wpływ liczby przepustów przez urządzenie formujące na wzrost wytrzymałości pokazano na rys. 4. Wpływ liczby przepustów przez urządzenie formujące na wzrost twardości pokazano na rys. 6. Wyniki te są skorelowane ze wzrostem własności mechanicznych.

Prawidłowość nowej konstrukcji narzędzi formujących i wielkość kąta $\alpha = 108^\circ$ w strefie odkształcenia zostały potwierdzone jako optymalne.

3. ANALIZA METALOGRAFICZNA STOPU CuZn37

3.1. Kąt kształtowania $\alpha=123^\circ$

Analiza metalograficzna została wykonana na mikroskopie świetlnym NEOPHOT 2. Po stan-

The results are correlated with the increase of mechanical properties. From the perspective of achieving the necessary strengthening of the alloy CuZn37 while maintaining the necessary ductility, it was proved that two passes through the forming tool can be regarded as sufficient in terms of the above criteria, as well as from the viewpoint of the needs of the industrial practice.

When an angle $\alpha = 108^\circ$ was used, the yield strength $R_{p0,2}$ increased by 24% already after the first pass through the forming tool, and after the 2nd pass, it increased by 35% in comparison with the initial state (see Fig. 3). Effect of number of passes forming machine to increase of ultimate strength R_m is shown in Fig. 4. The ductility value decreased after the first pass by 5% in comparison with the initial state. Ductility decreased after the second pass by 8.5% to an acceptable value of 24.7% enabling subsequent forming operations. It was proved that both after the second and third passes through the forming tool higher strengthening was achieved than at use of an angle $\alpha = 118^\circ$, which is in agreement with the published theoretical findings (see Fig. 3). The significant new finding is the achievement of the satisfactory value of ductility value A already after the first and second pass – that is 33.3 and 24.7% (see Fig. 5). Effect of number of passes forming machine to increase in strength is shown in Fig. 4. Effect of number of passes through a forming machine to increase the hardness is shown in Fig. 6. The results are correlated with the increase of mechanical properties.

The rightness of the new design of forming tools and of the magnitude of an angle $\alpha = 108^\circ$ in the zone of deformation was confirmed to be optimal.

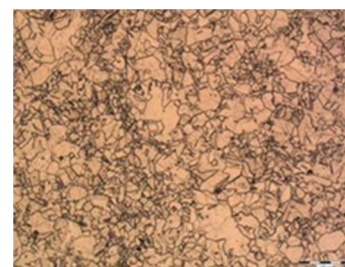
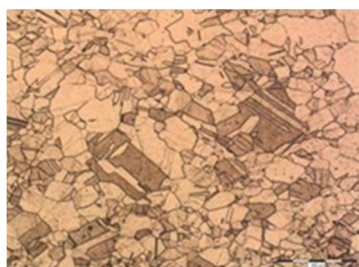
3. METALLOGRAPHIC ANALYZE CuZn37 ALLOY

3.1. Forming angle 123°

Metallographic analysis was made on light microscope NEOPHOT 2. After usual metallogra-

dardowym przygotowaniu zglądów metalograficznych, poddano je trawieniu. Wyniki wybranych mikrografii przedstawiono na rys. 7. Struktury próbek mosiądzu pokazane na rys. 7a przedstawiają makrostrukturę próbki mosiądzu w stanie początkowym. Ta makrostruktura składa się z ziaren, odpowiadających obróbce zastosowanej przed przetwarzaniem według technologii DRECE. Wielkość ziarna osiągnęła wartość G4 według ASTM. Mikrostruktury próbek mosiądzu po 2 i 4 przebiegach przez narzędzie formujące pokazano na rys. 7 b, c. Jak wynika z analiz, rozdrobnienie ziarna po każdym przejściu było niewielkie. Wielkość ziarna osiągnęła wartość od G5 do G6 według ASTM.

phic preparation the samples were chemically etched. Results of selected micrographs are shown in Fig. 7. Microstructures of brass samples are shown in Fig. 7a shows microstructure of initial state sample of brass. This microstructure consists of grains in agreement with the fact that this material was formed before the DRECE processing. Grain size reached the value G4 according to ASTM. Microstructures of brass samples after 2nd and 4th passes through the forming tool are shown in Fig. 7b, 7c. As it can be seen from these micrographs, refining of grains after each pass was only small. Grain size reached the value from G5 to G6 according to ASTM.



a) Makrostruktura w stanie początkowym

a) *Microstructure at initial state*

b) Makrostruktura po 2-gim przebiegu

b) *Microstructure after 2nd pass*

c) Makrostruktura po 4-tym przebiegu

c) *Microstructure after the 4th pass*

Rys. 7. Makrostruktura mosiądzu przy kącie formowania 123° a) stan początkowy, b) 2 przepust, c) 4 przepust

Fig. 7. Microstructure of the brass with forming angle 123° a) initial state, b) 2nd pass, c) 4th pass

3.2. Kąt kształtowania $\alpha = 108^\circ$

Próbki do analizy metalograficznej wytrawiono w roztworze $\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$. Zastosowano również metodę porównawczą z użyciem wzorców płytkowych III. Analizę wykonano na mikroskopie świetlnym NIKON EPIPHOT 300. Wszystkie próbki wykazują makrostrukturę złożoną z ziarna mosiądzu α z bliźniakami. Mikrostruktura próbek w stanie początkowym przy różnych powiększeniach pokazana jest na rys. 8 a, b. Próbki po pierwszym i drugim przebiegu przez narzędzie formujące, wykazują widoczne linie i pasma poślizgu po odkształceniu plastycznym (patrz rys. 9 a, b, c). Po trzecim przebiegu, linie poślizgu są wyraźniejsze (patrz Rys. 9 c). Wszystkie próbki mają wydłużone ziarna ze względu na odkształcenie, większe niż na krawędzi próbek, w ich środku, odkształcenie sporadycznie jest niewi-

3.2. Forming angle $\alpha = 108^\circ$

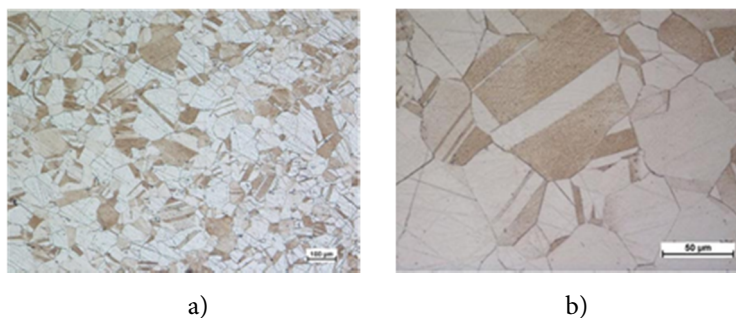
The samples for metallographic analysis were etched in a solution of $\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$. A comparative method with the use of Plate III standards was also used. The analysis was performed on a microscope NIKON EPIPHOT 300. All the samples have a microstructure formed by grains of α -brass with twins. The microstructure of the samples in the initial state at various magnifications is shown in Fig. 8a, 8b. The samples after the first second and third pass through the forming tool show apparent slip lines and bands after plastic deformation (see Figs. 9a, 9b, 9c). After the third pass the slip lines are more distinct (see Fig. 9c). All the samples have longitudinally elongated grains due to deformation, more so at the edges of the samples, in the centre the deformation is sporadically not apparent. The

doczne. Średnia wielkość ziarna po 3 przepus-
tach osiąga wartość 20 μm .

Analiza metalograficzna była również prze-
prowadzona dla kąta $\alpha = 118^\circ$. Wyniki oceny
wpływu liczby przepustów przez narzędzie do
formowania ma rozdrobnienie ziarna są bar-
dzo podobne.

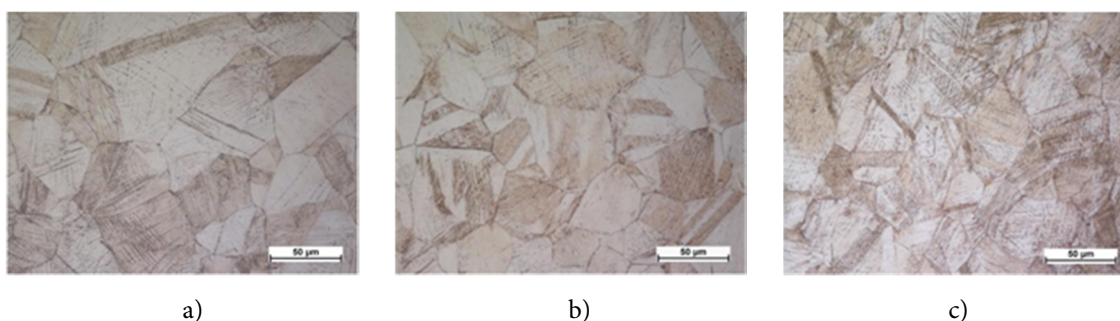
mean grain size after 3 passes reaches the values
of 20 μm .

Metallographic analysis was also performed
for the angle $\alpha = 118^\circ$. The results of evaluation
of the influence of the number of passes through
the forming tool on the grain refinement are very
similar.



Rys. 8. Stan początkowy CuZn37 a) 100x, b) 500x

Fig. 8. Initial state CuZn37 a) 100x, b) 500x



Rys. 9. Makrostruktura a) po przepuszczeniu (500x), b) po 2 przepuszczeniach (500x), c) po 3 przepuszczeniach (500x) przez narzędzie formujące

Fig. 9. Microstructure a) after 1st pass (500x), b) after 2nd pass (500x), c) after 3rd pass (500x) through forming tool

3.3. Analiza metalograficzna – podsumowanie

W stanie początkowym, mikrostruktura stopu CuZn37 składała się z ziaren o dominującej średniej wielkości ziarna 70–80 μm . Po pierwszym przepuszczeniu przez narzędzie formujące, wystąpiło niewielkie rozdrobnienie ziarna przy dominującej średniej wielkości ziarna 50 μm . Po drugim przepuszczeniu, wystąpiło dalsze rozdrobnienie do średniej wielkości 20–30 μm . Charakteryzuje się ono nagromadzeniem dyslokacji wzdłuż granic ziarna (umocnienie dyslokacyjne) oraz początkiem tworzenia się subziarna. W przypadku większej liczby przepustów przez narzędzie formujące, możliwe jest oczekiwanie znaczącego rozdrobnienia ziaren (osiągnięcie struktury UFG), a zatem również za-

3.3. Metallographic analysis – summary

In the initial state the microstructure of the alloy CuZn37 consists of grains with prevailing average grain size of 70–80 μm . After the first pass through the forming tool, a slight refining of grain with a predominant mean size of 50 μm takes place. After the second pass, a further refinement takes place to a mean size of 20–30 μm . It is characterised by the accumulation of dislocations along the grain boundaries (dislocation reinforcement) and the beginning of the formation of sub-grains. In the case of larger number of passes through the forming tool, it is possible to expect a substantial grain refinement (reaching of UFG structure) and therefore also

chowanie pierwotnej plastyczności przy wymaganym zwiększeniu granicy plastyczności $R_{p0,2}$.

4. WNIOSKI

Zaprojektowano urządzenia do wytwarzania struktury UFG w taśmach blachy z metali nieżelaznych, z dalszą możliwością odkształcania również blach stalowych o grubości 2 mm. Proces ten obejmuje przede wszystkim tworzenie odpowiedniej liczby systemów ścinania o różnej orientacji w siatce krystalograficznej. Wytworzenie struktury UFG w taśmie blachy jest ściśle związane z zaprojektowaniem odpowiedniej geometrii narzędzia formującego, odpowiednio wymiarowanego bloku zasilania oraz układu sterowania, umożliwiających ustawienie różnych wartości prędkości obwodowych. Z punktu widzenia parametrów formowania, większa liczba przepustów przyniesie znaczące umocnienie formowanego materiału. Zgodnie ze stopniem uzyskanych wyników wyciskania blachy z mosiądzu, można stwierdzić, że urządzenie jest w pełni funkcjonalne. Urządzenie do formowania jest na etapie weryfikacji i przyszłe prace zweryfikują wpływ parametrów technologicznych na wzrost efektywności procesu SPD dla uzyskiwania struktury UFG w metalach nieżelaznych. Z punktu widzenia uzyskanych parametrów, większa liczba przepustów przyniesie znaczne rozdrobnienie ziarna i umocnienie uformowanego materiału. W celu zastosowania uzyskanych wyników w praktyce przemysłowej ważne jest, aby zoptymalizować liczbę przepustów przez narzędzie formujące. Z punktu widzenia uzyskania maksymalnego rozdrobnienia ziaren, konieczne jest zwiększenie liczby przepustów przez narzędzie formujące, przy mniejszym wzroście umocnienia materiału (stopu CuZn37), w celu odzyskania plastyczności. Po 3 przepuszczeniu przez narzędzie formujące, granica plastyczności $R_{p0,2}$ praktycznie nie wzrasta. Z punktu widzenia efektywności procesu SPD, redukcja „kąta formowania” w obszarze plastyczności z pierwotnej wartości $\alpha = 123^\circ$ do optymalnej wielkości 108° stanowi bardzo ważne odkrycie. Znaczący wzrost $R_{p0,2}$ został osiągnięty już po 1 i 2 przepuszczeniu przez narzędzie formujące. Po pierwszym

the preservation of the original plasticity at the required increase in yield strength $R_{p0,2}$.

4. CONCLUSION

Equipment for production of UFG structure in a strip of a sheet made of non-ferrous metals has been designed, with subsequent possibility of deformation also of steel sheets with a thickness of 2 mm. This process involves primarily creation of a sufficient number of shear systems with different orientation in the crystallographic lattice. Creation of UFG structure in the strip of the sheet is closely connected to the design of suitable geometry of the forming tool, appropriately dimensioned power unit and control system enabling setting of various values of peripheral velocities. From the viewpoint of forming parameters, the higher number of passes will bring a considerable strengthening of the formed material. According to the degree of the obtained results of extrusion of the sheet made of brass, it is possible to state that the equipment is fully functional. The forming equipment is at the stage of verification and future works will verify the influence of technological parameters on the increase of efficiency of the SPD process for obtaining the UFG structure in non-ferrous metals. From the viewpoint of forming parameters, the higher number of passes will bring considerable grain refining and strengthening of the formed material. For the application of the achieved results in the industrial practice, it is very important to optimise the number of passes through the forming tool. From the viewpoint of achieving the maximum grain refinement, it is necessary to make a larger number of passes through the forming tool when no further strengthening of the material occurs anymore (alloy CuZn37) but to recovery of plasticity by its increase takes place. After the 3rd pass through the forming tool the yield strength $R_{p0,2}$ practically does not increase. From the perspective of efficiency of the SPD process, a reduction of the “forming angle” in the plastic region from the original value $\alpha = 123^\circ$ to the optimal size of 108° is very important finding. A significant increase of $R_{p0,2}$ was achieved already after the 1st and 2nd pass through the forming tool. Drop in

przepracowanie spadek plastyczności jest minimalny – tylko 5%, a po drugim przepracowaniu stanowi 14%, co pozwala na następne operacje formowania na taśmie blachy, a tym samym produkcję finalnych komponentów (zawiasy, wsporniki, zaciski do zamków samochodowych, itp.). Przyszłe prace będą badały wpływ parametrów technologicznych i formowania (nacisk walców, szybkość odkształcania) na dalszy wzrost efektywności procesu SPD.

PODZIĘKOWANIA

Niniejszy artykuł powstał jako część projektu działań załączkowych VSB-TUO II – Materiały, No. CZ.1.05/3.1.00/14.0320 oraz w ramach projektu Ministerstwa Przemysłu i Handlu (MPO) nr 2A ITP1/ 24 i utworzenia Projektu międzynarodowego zespołu naukowców i uczestnictwa w sieciach naukowych w dziedzinie nanotechnologii i niekonwencjonalnego kształtowania materiałów nr CZ.1.07/2.3.00/20,0038.

LITERATURA

- [1] Gutkin M.Yu., I.A. Ovidko, C.S. Pande. 2001. „Theoretical models of plastic deformation processes in nanocrystalline materials”. *Reviews on Advanced Materials Science* 2 (September): 80–102.
- [2] Kobayashi M., M. Miyagawa. 1987. „Research and Development of Superplastic Materials – Recent Progresses and Future Prospects”. *Metallurgical Transactions* 18A: 685–695.
- [3] Malanik K., T. Donic, J. Kedron, S. Tylsar, M. Salajka. 2011. „Development of Structure at Extrusion of a Strip of Made of Cu through the DRECE Machinery”. *Journal of Materials Science and Engineering A* 1: 844–848.
- [4] Valiev R. 2008. „Recent developments of severe plastic deformations techniques for processing bulk nanostructured materials”. *Materials Science Forum A* 579: 1–14.
- [5] Michenka V., M. Gottwald, K. Malanik, S. Ruz. 2009. „Research of influence of extreme deformation conditions on metal sub-microstructure and development of testing methods for evaluation of their technological properties”. W mat. konf. Conference proceeding METAL 2009, TANGER, May 2009, 1–9.

plasticity is minimal after the first pass – only 5%, and after the second pass it makes 14%, which allows next forming operations on a strip of the sheet, and thus a production of the final components (hinges, brackets, clips for car locks, etc.). The future works will investigate the influence of technological and forming parameters (the thrust of rolls, strain rate) on a further increase of efficiency of the SPD process.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was created as a part of the project of the Pre-seed activity of the VSB-TUO II – Materials, No. CZ.1.05/3.1.00/14.0320, and within the project of the Ministry of Industry and Trade (MPO) No. 2A ITP1/124 and project Creation of an international team of scientists and participation in scientific networks in the sphere of nanotechnology and unconventional forming of material No. CZ.1.07/2.3.00/20.0038.

REFERENCES

- [1] Gutkin M.Yu., I.A. Ovidko, C.S. Pande. 2001. “Theoretical models of plastic deformation processes in nanocrystalline materials”. *Reviews on Advanced Materials Science* 2 (September): 80–102.
- [2] Kobayashi M., M. Miyagawa. 1987. “Research and Development of Superplastic Materials – Recent Progresses and Future Prospects”. *Metallurgical Transactions* 18A: 685–695.
- [3] Malanik K., T. Donic, J. Kedron, S. Tylsar, M. Salajka. 2011. “Development of Structure at Extrusion of a Strip of Made of Cu through the DRECE Machinery”. *Journal of Materials Science and Engineering A* 1: 844–848.
- [4] Valiev R. 2008. “Recent developments of severe plastic deformations techniques for processing bulk nanostructured materials”. *Materials Science Forum A* 579: 1–14.
- [5] Michenka V., M. Gottwald, K. Malanik, S. Ruz. 2009. “Research of influence of extreme deformation conditions on metal sub-microstructure and development of testing methods for evaluation of their technological properties”. In conf. proceed. of Conference proceeding METAL 2009, TANGER, May 2009, 1–9.

- [6] Rusz S., J. Dutkiewicz, M. Faryna, W. Maziarz, Ł. Rogal, J. Bogucka, K. Malanik, J. Kedroń, S. Tylsar. 2012. "SEM EBSD and TEM structure studies of α -brass after severe plastic deformation using equal channel rolling followed by groove dressing". *Solid State Phenomena* 186: 94–97.
- [7] Ochodek V., P. Boxan. 2014. "Weldability of carbon steel processed by multiple plastic deformation". *Archives of Materials Science and Engineering* 69 (2): 88–93.
- [8] Rusz S., L. Čížek, M. Salajka, J. Kedroń, S. Tylšar. 2014. "Processing of low carbon steel by dual rolls equal channel extrusion". *Materials Science and Engineering* 63: pp.1-11.
- [9] Hrubý J., V. Schindlerová, J. Rentka. 2015. "Degradation processes in the contact layers of forming tools". *Manufacturing Technology* 15 (5): 836–842.
- [6] Rusz S., J. Dutkiewicz, M. Faryna, W. Maziarz, Ł. Rogal, J. Bogucka, K. Malanik, J. Kedroń, S. Tylsar. 2012. "SEM EBSD and TEM structure studies of α -brass after severe plastic deformation using equal channel rolling followed by groove dressing". *Solid State Phenomena* 186: 94–97.
- [7] Ochodek V., P. Boxan. 2014. "Weldability of carbon steel processed by multiple plastic deformation". *Archives of Materials Science and Engineering* 69 (2): 88–93.
- [8] Rusz S., L. Čížek, M. Salajka, J. Kedroń, S. Tylšar. 2014. "Processing of low carbon steel by dual rolls equal channel extrusion". *Materials Science and Engineering* 63: pp.1-11.
- [9] Hrubý J., V. Schindlerová, J. Rentka. 2015. "Degradation processes in the contact layers of forming tools". *Manufacturing Technology* 15 (5): 836–842.