



## Badania walcowania ze zmianą drogi odkształcenia miedzi i stopu niklu Inconel 825

### *Research on copper and inconel 825 nickel alloy rolling with deformation path changes*

(1) Marek Pawlicki<sup>1</sup>, (2) Paweł Ostachowski\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pratt & Whitney Kalisz Sp. z o.o., ul. Elektryczna 4a, 62-800 Kalisz, Poland

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Metali Nieżelaznych, Pracownia Struktury i Mechaniki Ciała Stałego, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 3.08.2017

Recenzja: 1.09.2017

Akceptacja: 30.03.2018

#### Wkład autorów

(1) Autor koncepcji i przeprowadzonych badań

(2) Autor koncepcji i przeprowadzonych badań

#### Streszczenie

W pracy opisano badania walcowania wzdłużnego i walcowania ze zmianą drogi deformacji miedzi i stopu niklu Inconel 825. Walcowanie ze zmianą drogi odkształcenia realizowano w taki sposób, że w pierwszej operacji wykonano jeden przepust walcowania wzdłużnego, a następnie z walcówek wycięto próbki do dalszych badań pod takim kątem, jaki odpowiadał kątowi skręcenia materiału w badaniach zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego. Następnie dla tak wykonanych próbek realizowano kolejny przepust walcowania wzdłużnego. Badania te stanowiły punkt odniesienia w stosunku do badań walcowania wzdłużnego (monotonicznego). Wyznaczono chropowatość i mikrotwardość próbek walcowanych obydwoma metodami celem wskazania mechanizmów odkształcania na drodze konwencjonalnego walcowania wzdłużnego, walcowania ze zmianą drogi deformacji i porównania z wynikami dla wytłoczek zgniecionych obrotowo wydłużająco współbieżnie. Przeprowadzono również obserwacje strukturalne z użyciem mikroskopii optycznej i skaningowej mikroskopii elektronowej. Określono wpływ parametrów procesu na strukturę ziarnową i podatność materiału do lokalizacji odkształcenia w postaci pasm ścinania. Przedstawiona została również topografia powierzchni bocznych miedzi i stopu Inconel 825 po walcowaniu z wymuszoną zmianą drogi odkształcenia ujawniająca silne pasmowanie materiału. Wszystkie wyniki wykazały, że jedynie walcowanie ze zmianą drogi deformacji stanowi dobre przybliżenie modelowe procesu zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego.

**Słowa kluczowe:** walcowanie, zgniatanie obrotowe, zmiana drogi odkształcenia, miedź, Inconel 825

#### Article info

Received: 3.08.2017

Reviewed: 1.09.2017

Accepted: 30.03.2018

#### Authors' contribution

(1) Author of concept and research

(2) Author of concept and research

#### Abstract

The paper describes research on longitudinal rolling and rolling with deformation path changes of copper and Inconel 825 nickel alloy. Rolling with deformation path changes included two stages. In the first stage the material underwent a longitudinal rolling, after which specimens were cut out from the obtained rolled samples at the same angle as the angle of the material's twisting observed during its flow forming. Subsequently, these specimens underwent another longitudinal rolling procedure. The research was a benchmark for monotonic longitudinal rolling testing. Roughness and microhardness of specimens rolled with both methods were established in order to evaluate deformation mechanisms in the following cases – conventional longitudinal rolling, rolling with deformation path changes, and flow forming. Structural observations with the use of optical and scanning electron microscopy were also carried out. The impact of the process' parameters on grain structure and the material's susceptibility to localization of

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 617 26 52; e-mail: pawel.ostachowski@agh.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 12 617 26 52; e-mail: pawel.ostachowski@agh.edu.pl

*deformation in the form of shear bands were established. Topography of side surfaces of copper and Inconel 825 alloy after rolling with a forced change of deformation path, showing a high degree of banding in the material, was also presented. All results seem to confirm expectations that only the process of rolling with deformation path changes is close to the model of flow forming.*

**Keywords:** rolling, flow forming, deformation path changes, copper, Inconel 825

## 1. WPROWADZENIE

Rozwój nowoczesnych technologii i wymagania odnośnie do pożądaných rynkowo produktów wymuszają stosowanie coraz lepszych materiałów. Jednym z nich jest stop niklu Inconel 825. Jednak trudności z odkształceniem tego materiału powodują, że koniecznym jest poszukiwanie narzędzi i specjalnych technologii obróbki plastycznej.

Pawlicki i inni [1] opisali sposób odkształcenia wykorzystujący zmianę drogi deformacji w procesach walcowania akumulacyjnego, a w rezultacie silne rozdrobnienie struktury aluminium, które wpływa na właściwości mechaniczne, a przede wszystkim na podatność do kształtowania plastycznego (mierzoną np. próbą tłoczności).

Zbadanie właściwości mechanicznych materiałów uzyskanych na drodze spęczania i łączenia plastycznego miedzi i aluminium, które zostały uprzednio wyciśnięte hydrostatycznie (a więc również wytworzonych na drodze zmiany drogi deformacji), stanowiło przedmiot pracy [2].

Jest znany szereg technologii wykorzystujących korzystne właściwości materiałów uzyskanych dzięki zmianie drogi deformacji. Takim procesem technologicznym jest również zgniatanie obrotowe wydłużające współbieżne (ZOWW), które jest jedną z najnowocześniejszych i nadal rozwijanych technologii kształtowania obrotowego wyrobów z blach (rys. 1). Zazwyczaj obejmuje on 2 operacje:

1. kształtowanie, w klasycznym procesie tłoczenia wytłoczki cylindrycznej lub (rzadziej) przygotowanie wsadu (wstępniaka) w kształcie grubościennej tulei poprzez obróbkę skrawaniem,
2. wyciąganie ścianki poboczniczy wytłoczki, bądź wstępniaka, poprzez zgniatanie obrotowe rolkami (2) na obracającym się wzorniku (3). W szczególności wytłoczkę cylindryczną mocuje się na wzorniku. Wraz ze wzornikiem i wyrobem kształtowanym obrotowi ulega rów-

## 1. INTRODUCTION

*The development of new technologies and the need to deliver products that meet current market requirements impose the necessity for constant improvement of the materials used. One of the best materials available these days is Inconel 825 – a nickel alloy, but it is hard to deform, therefore new tools and special deformation technologies are of high demand.*

*Pawlicki and colleagues [1] described a deformation procedure involving deformation path changes used in accumulative roll-bonding, resulting in strong fragmentation of aluminum structure, which influences the material's mechanical properties, particularly its plastic deformability (measured by e.g. press forming test).*

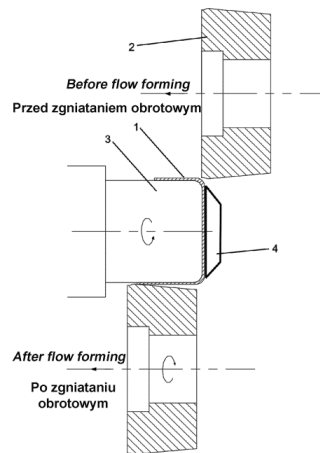
*Research on mechanical properties of materials obtained as a result of upsetting and plastic joining of copper and aluminum, earlier hydrostatically extruded (i.e. produced as a result of deformation path changes) was the subject of paper [2].*

*There are a number of technologies utilizing the favorable properties of materials obtained as a result of deformation path changes. One of them is a process called flow forming – a developing state of the art procedure of shear forming for sheet metal products (Fig. 1). It usually consists of 2 stages:*

1. *conventional drawing of a cylindrical drawpiece or (less often) preparation of a load (preform) in the shape of a thick-walled tube through machining,*
2. *drawing of the side surface wall of the drawpiece (or preform) through flow forming with rollers (2) on a spinning mandrel (3). Particularly the cylindrical drawpiece has to be mounted on a mandrel. Alongside the mandrel and the workpiece a blank holder with bear-*

niez ułożyskowany dociskacz (4) zapobiegający drganiom, nadmiernym poślizgom i wstępnej niestabilności procesu zgniatania obrotowego. Poprzez dociskanie dna wytłoczki do czoła wzornika zapobiega m.in. wyboczeniu materiału wytłoczki lub jej skantowaniu w początkowej fazie kształtowania. Redukcja ścianki poboczniczy uzyskana w zgniataniu obrotowym jest zamierzona, ujęta w procesie technologicznym i wynika bezpośrednio z przyjętej szczeliny pomiędzy wzornikiem a rolkami kształtującymi.

ings (4) is being rotated, which prevents vibration, excessive slips and initial instability of the flow forming process. Pressing the bottom of the drawpiece to the mandrel front prevents the for-med material e.g., from buckling or rimming during the initial phase of deformation. Reduction of the side surface wall, achieved in the flow forming process, is deliberate, it is part of the technology and a direct result of a set aperture between the mandrel and the forming rollers.



Rys. 1. Schemat procesu zgniatania obrotowego wydłużającego współbieżnego wytłoczki cylindrycznej: 1 – materiał wyjściowy (wytłoczka cylindryczna), 2 – narzędzia kształtujące (rolki), 3 – wzornik, 4 – łożyskowany dociskacz

Fig. 1. Scheme of flow forming for a cylindrical drawpiece: 1 – initial material (cylindrical drawpiece), 2 – forming tools (rollers), 3 – mandrel, 4 – blank holder with bearings

Możliwość uzyskiwania znacznych odkształceń plastycznych w procesie ZOWW, odmiennie aniżeli w konwencjonalnych procesach tłoczenia związana jest z lokalizacją deformacji w pasmach ścinania, spotęgowana zmianą drogi odkształcenia. Lokalizacja odkształcenia wynika ze specyfiki procesu ZOWW, co opisano w pracach [3–6]. Wzrost odkształcenia, w przypadku zmiany drogi deformacji, w procesie ZOWW również może prowadzić do stabilizacji właściwości mechanicznych [3, 4, 6].

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono modelowe próby walcowania technicznie czystej miedzi i przemysłowego stopu Inconel 825 w schemacie zbliżonym do procesu ZOWW, czyli w warunkach, zmiany drogi odkształcenia w celu identyfikacji doświadczalnej i weryfikacji dominującego mechanizmu odkształcenia. Wprowadzenie zmiany kierunku walcowania materiału

The possibility of significant plastic deformations in the flow forming process, is linked, unlike in conventional pressing procedures, with strain localization in shear bands, boosted by deformation path changes. Localization of plastic deformation results from the specifics of the flow forming process, which were described in papers [3–6]. Strain increase in the case of deformation path changes might, in flow forming, also lead to the stability of mechanical properties [3, 4, 6].

For the purposes of this paper, model attempts to roll technically pure copper and Inconel 825 industrial alloy according to a scheme similar to flow forming, i.e. with deformation path changes, were conducted in order to experimentally identify and verify the dominant deformation mechanism. The aim of rolling direction change was to reflect the process of flow forming in the

miało za zadanie jak najlepiej odzwierciedlić proces zgniatania obrotowego. Walcowanie krzyżowe (ze zmianą kierunku deformacji) stanowiło bazę do modelowania fizycznego procesu zgniatania obrotowego, a walcowanie monotoniczne (bez zmiany kierunku) było punktem odniesienia dla walcowania ze zmianą kierunku.

Pasma ścinania bardzo słabo ujawniają się w odkształcanych próbkach po ich szlifowaniu, wypolerowaniu i wytrawieniu. Tylko odpowiednio przeprowadzone badania zapewniają obecność powierzchni „swobodnych” podczas odkształcenia. Stwarza to szanse zarejestrowania takich efektów będących elementami historii deformacji. Z racji specyfiki procesu zgniatania obrotowego nie ma dostępu do powierzchni „swobodnych”, stąd modelowe próby walcowania spełniają zarówno wymagania obserwacyjne, jak i podobieństwo procesów.

Na skutek realizowanego „na zimno” w sposób monotoniczny plastycznego odkształcania materiałów metalicznych, zwiększają się ich właściwości wytrzymałościowe. Wzrost ten, początkowo bardzo intensywny, słabnie w miarę zaawansowania procesu, a przy bardzo dużych odkształceniach plastycznych może nawet zostać całkowicie zatrzymany [7–10, 12]. W ostatnich kilku dekadach zainteresowanie budzą jednak głównie takie schematy deformacji materiału, często powiązane ze zmianą drogi odkształcenia w sposób sekwencyjny, cykliczny lub ciągły (jak np. metoda ZOWW), w wyniku których – praktycznie niemal na dowolnym etapie procesu odkształcenia – może następować stabilizacja właściwości wytrzymałościowych.

Z fizycznego punktu widzenia odpowiedzialna za umocnienie odkształceniowe struktura o wzrastającej gęstości dyslokacji jest mechanicznie nietrwała i może zostać zburzona (przebudowana na nowo) w wyniku samoistnej lub zewnętrznie wymuszonej zmiany drogi deformacji [14–16]. Prowadzi to do obniżenia współczynnika umocnienia i niejednorodnego plastycznego płynięcia w formie np. pasm ścinania. Sprawia to, że procesy technologiczne nierzadko mogą być prowadzone bez kosztownej międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

*best possible way. Cross rolling (with deformation direction change) was the base for physical modelling of flow forming, whereas monotonic rolling (without direction change) was a base for rolling with change of direction.*

*Shear bands barely show in the deformed specimens after they have been ground, polished and etched. Only tests conducted in a particular way ensure the presence of ‘free’ surfaces during deformation. In the flow forming process there is no access to the ‘free’ surfaces, therefore our model attempts of rolling meet the observational requirements and guarantee similar conditions at the same time.*

*As a result of ‘cold’ monotonic plastic deformation the mechanical properties of metallic materials increase in value. The increase, at first very intense, becomes weaker as the process progresses and in really strong plastic deformations might even stop altogether [7–10, 12]. Over the last couple of decades, deformation schemes often involving sequential, cyclic or constant change of deformation path (such as flow forming) are becoming increasingly popular, as they allow for stabilization of mechanical properties of the deformed material virtually at any stage of the deformation process.*

*From a physical point of view, the structure with increasing dislocation density, responsible for the strain hardening, is mechanically instable and can be disturbed (re-built) as a result of self – or externally imposed change of deformation path [14–16]. That leads to a decrease in the strain hardening coefficient and non-homogenous plastic flow in the form of e.g. shear bands, which sometimes means that technological processes can be performed without costly mid-operational heat-treatment.*

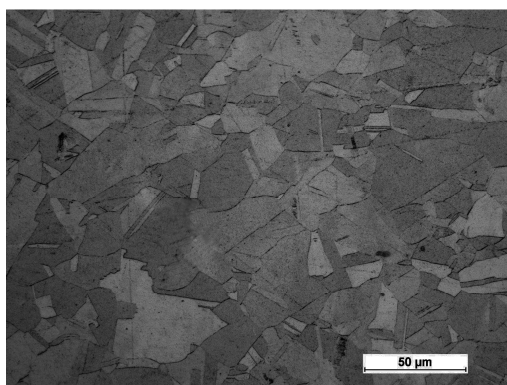
## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

W ramach procesu zgniatania obrotowego wykonano próby złożonego walcowania wzdłużnego próbek na walcierce duo WD-2 produkcji INOP posiadającej walce robocze o średnicy 102 mm i szerokości beczki 128 mm przy prędkości obrotowej ~120 obr./min.

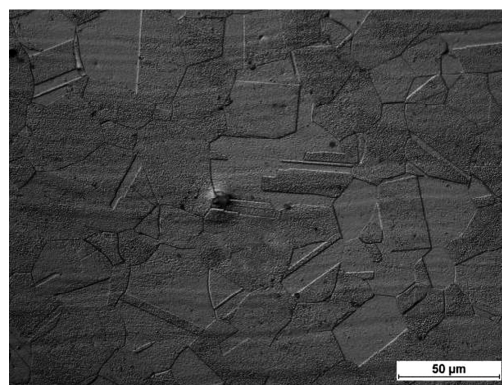
Dane materiałowe wykorzystanych w pracy miedzi i stopu Inconel 825 (wyniki statycznej próby rozciągania, wyjściowa wielkość ziaren) szczegółowo opisano w pracach [1-4]. Najważniejsze właściwości tych materiałów są następujące:

- dla miedzi:  $R_{0,2} = 50\text{MPa}$ ,  $R_m = 221\text{MPa}$ ,  $A = 46\%$ , średnia wielkość ziarna wynosiła  $35\ \mu\text{m}$ ;
- dla stopu niklu:  $R_{0,2} = 390\text{MPa}$ ,  $R_m = 663\text{MPa}$ ,  $A = 44\%$ , średnia wielkość ziarna wynosiła  $62\ \mu\text{m}$ .

Obydwa materiały jako wyjściowe do walcowania posiadały strukturę zrekrytalizowaną z dobrze widocznymi bliźniakami wyżarzania – rys. 2. Składy chemiczne stopu Inconel i miedzi, zbadane mikroanalizatorem rentgenowskim EDS – Genesis 2 (EDAX), zamieszczono w tab. 1 i 2.



a)



b)

Rys. 2. Mikrostruktury materiałów wyjściowych z wyraźnie widocznymi bliźniakami wyżarzania: a) miedzi, b) stopu Inconel 825

Fig. 2. Microstructures of initial materials with clearly visible annealing twins: a) copper, b) Inconel 825 alloy

Tab. 1. Skład chemiczny (w procentach wagowych) miedzi

Tab. 1. Chemical composition (weight percent) of copper

Cu+Ag	Bi	Pb	Sb	As	Fe	Ni	Sn	O <sub>2</sub>	Zn	S
≥99,9	0,001	0,005	0,002	0,002	0,005	0,002	0,002	≤0,05	0,004	≤0,004

Tab. 2. Skład chemiczny (w procentach wagowych) stopu Inconel 825

Tab. 2. Chemical composition (weight percent) of Inconel 825

Ni	Fe	Cr	Mo	Cu	C	Al	Si	Ti	V	Mn	Pozostałe / Other
37,53	29,73	22,54	3,15	2,55	2,18	0,23	0,38	0,79	0,13	0,7	Reszta / Balance

Próbki przeznaczone do walcowania wycięto z arkuszy blach o grubości 2,46 mm dla miedzi i 2 oraz 3 mm dla stopu Inconel 825 w dwóch kierunkach (wzdłuż i w poprzek arkusza).

W procesie walcowania w kierunkach wzdłużnych oraz poprzecznych nadawano gnioty względne, zbliżone do gniotów realizowanych podczas zgniatania obrotowego. W badaniach procesu zgniatania obrotowego wydłużającego zastosowano następujące parametry technologiczne: prędkość obrotowa – 500 obr./min, posuw rolek kształtujących w ruchu roboczym: 150, 250, 300, 350, 400 mm/min. Gnioty zastosowane były następujące:

- dla miedzi: 33% i 39% (odkształcenie sumaryczne: 33 i 59%);
- dla stopu Inconel 825: 35%, 35% i 30% (odkształcenie sumaryczne: 35, 58 i 70%).

Szczegóły dotyczące nastaw w poszczególnych przepustach i uzyskiwane grubości szczegółowo opisano w pracach [3–6].

Proces walcowania monotonicznego prowadzono bez zmiany kierunku odkształcenia. W walcowaniu krzyżowym zmiana kierunku deformacji polegała na tym, że po przepuszczeniu walcowniczym w jednym kierunku dokonywano obrotu próbki i walcowano materiał pod kątem w stosunku do pierwotnego kierunku. Kąt ten był zgodny z zaobserwowanym kątem skręcenia materiału podczas badań zgniatania obrotowego [3]. Poprzez zmianę schematu walcowania (z wzdłużnego na poprzeczny) zrealizowana została zewnętrznie wymuszona zmiana drogi odkształcenia [7]. Należy wspomnieć, że duże odkształcenia, nawet dokonywane w sposób monotoniczny, mogą prowadzić do samowzbudnej zmiany drogi odkształcenia, ale przy znacznie wyższych wartościach odkształcenia. Czasem są one niemożliwe do osiągnięcia z powodu pęknięcia bądź niszczenia materiału [9–13]. Dlatego rozwiązaniem jest stosowanie zmiany drogi deformacji. Dla miedzi wykonano trzy przepusty, a dla stopu Inconel 825 dwa lub trzy.

*Specimens for rolling were cut out of sheet metals with 2,46 mm thickness for copper, and 2 and 3 mm for Inconel 825, in two directions (lengthwise and crosswise).*

*The total deformation in longitudinal and transverse rolling approximated the deformation during flow forming. Technological parameters of the flow forming research were as follows: rotational speed – 500 turns/min., forming rollers feed in working motion: 150, 250, 300, 350, 400 mm/min. The following deformation were used:*

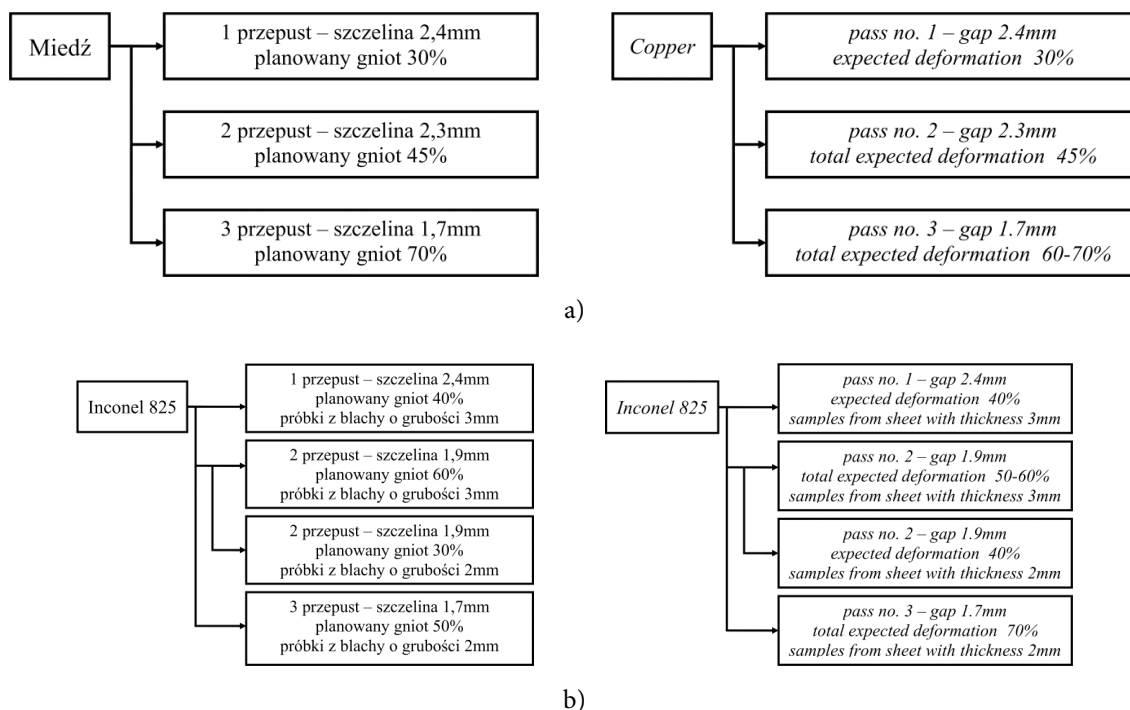
- for copper: 33 and 39% (total deformation: 33 and 59%);
- for Inconel 825: 35, 35 and 30% (total deformation: 35, 58 and 70%).

*Details regarding the settings during respective roll passes and obtained thicknesses were presented in papers [3–6].*

*Monotonic rolling was performed without deformation path changes. In the cross rolling process, deformation path changes involved turning the specimen after roll pass in one direction and rolling it again at an angle in relation to the initial direction. The angle was compatible with the twisting angle of the material observed during flow forming [3]. The change of rolling scheme (from longitudinal to transverse) imposes an external change of the deformation path [7]. It is noteworthy, that large deformations might lead to self-activating deformation path changes, but only in the case of higher deformation values. Such values are sometimes impossible to reach, due to the materials' fracture or destruction [9–13]. That is why imposing deformation path changes is a good solution. For copper, three rolling passes were conducted and for Inconel 825 – two or three. Detailed schemes of longitudinal (monotonic) rolling and rolling*



Szczegółowy plan walcowania wzdłużnego (monotonicznego) i walcowania ze zmianą drogi deformacji pokazano na schemacie – rys. 3.

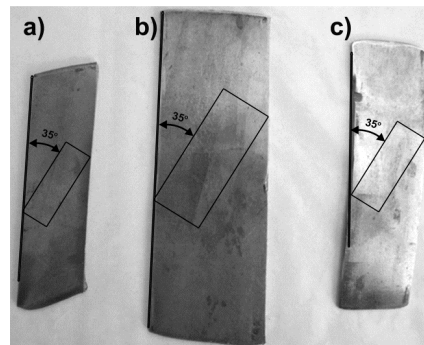


Rys. 3. Szczegółowy plan badań walcowania wzdłużnego oraz badań walcowania ze zmianą drogi deformacji z materiałów miedzi a) i stopu Inconel 825 b)

Fig. 3. Detailed research plan for longitudinal rolling and for rolling with deformation path change for a) copper and b) Inconel 825

Przeprowadzono próby modelowania fizycznego technologii zginięcia obrotowego wydłużającego współbieżnego na bazie walcowania krzyżowego. W tym celu przygotowano próbki z blachy wyjściowej z miedzi o grubości początkowej 2,46 mm oraz stopu Inconel 825 o grubości początkowej równej 2 i 3 mm. Po walcowaniu wzdłużnym po pierwszym przepuszczeniu wycięto z nich próbki pod kątem 35° do kierunku walcowania (rys. 4), a następnie wyszlifowano i wypolerowano powierzchnie boczne w celu obserwacji topografii powierzchni jako świadectwa zmian strukturalnych związanych ze sposobem nadawania odkształcenia. Kąt wycinania próbek w stosunku do kierunku walcowania z pierwszego przepustu odpowiada zaobserwowanemu (rys. 5) w próbach zginięcia obrotowego kątowni skręcania materiału [5].

Attempts at physical modelling of the flow forming process based on the cross rolling procedure were undertaken. Specimens from output copper sheet with initial thickness of 2,46 mm and Inconel 825 with initial thickness of 2 and 3 mm were prepared for that purpose. After the first roll pass of longitudinal rolling specimens were cut out of these materials at an angle of 35° in relation to the direction of rolling (Fig. 4), and subsequently their side surfaces were ground and polished in order to observe the surface topography as a source of structural changes linked to the type of deformation process. The cutting angle of specimens in relation to the direction of rolling during the first roll pass is compatible with the angle of twisting observed (Fig. 5) in the material's flow forming [5].



Rys. 4. Schemat pobierania próbek do walcowania ze zmianą drogi odkształcenia po pierwszym przepuszczeniu; blachy o grubości wyjściowej 2 mm ze stopu Inconel 825 – a) i miedzi – b); oraz ze stopu Inconel 825 o grubości wyjściowej 3 mm – c)

*Fig. 4. Scheme of specimen cutting for rolling with deformation path change after first pass; sheets of a) Inconel 825 and b) copper with initial thickness of 2 mm; and sheets of Inconel c) with initial thickness of 3 mm*



Rys. 5. Przykładowa próbka po procesie ZOWW z zaznaczonym kątem skręcenia materiału względem osi wytłoczki  
*Fig. 5. One of the specimens after flow forming with the materials' angle of twisting in relation to the axis of drawpiece marked*

Tak przygotowany wsad poddano drugiemu przepustowi walcowania wzdłużnego. W ten sposób starano się upodobnić przebieg procesu złożonego walcowania do zgniatania obrotowego. Wyniki badań mają dowiedzieć, czy wymuszona zmianą kierunku walcowania [11–14] zmiana drogi odkształcenia jest analogiczną do tej, która ma miejsce podczas zgniatania obrotowego.

O ile zjawisko zlokalizowanego plastycznego płynięcia staje się dominującym mechanizmem odkształcenia metalu w monotonicznie (tj. jednokierunkowo) prowadzonych procesach odkształcenia dopiero na zaawansowanych ich etapach (przy końcu procesu), o tyle zewnętrznie wymuszona zmiana drogi deformacji plastycznej (schematu obciążenia) może prowadzić do niego praktycznie na dowolnym etapie procesu. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że bardzo często geometria wsadu (wytłoczki, odkuwki, półproduktu) i otrzymanego z niego wyrobu na-

*Load prepared in this way was subjected to a second longitudinal roll pass. The purpose of that was to liken the procedure to flow forming. The results are expected to confirm whether the deformation path change imposed by change of the rolling direction [11–14] is analogous to the one taking place during flow forming.*

*The phenomenon of localized plastic flow in monotonic (one-directional) deformation processes dominates the procedure only at its advanced stages (at the end of the process), whereas the externally imposed change of plastic deformation path (load scheme) might lead to it virtually at any point during the process. Importantly, the geometry of the load (drawpiece, forging, semi-finished product) and its final product often imposes the use of complex load schemes and, simultaneously, promotes the localization of*



rzuca stosowanie złożonych schematów obciążania, a tym samym promuje lokalizację plastycznego płynięcia. Jednak niezależnie od przyczyn zazwyczaj zmiana drogi odkształcenia – poprzedzona powstaniem wyraźnie skonfigurowanej struktury dyslokacyjnej – może prowadzić do lokalizacji odkształcenia (a jest to zjawisko dynamiczne) i określonych skutków strukturalnych w wyrobach [15–17].

Pomiary chropowatości powierzchni i wyznaczenie profili chropowatości oraz parametrów  $R_a$ ,  $R_t$  i  $R_z$  przeprowadzono na profilometrze Hommel Etamic Turbo Wave V7 36. W pracy [4] pokazano wykresy profilu chropowatości i parametry chropowatości dla materiału miedzi oraz dla stopu Inconel 825 po zgniataniu obrotowym. W niniejszym artykule przedstawione zostaną wyniki badań dla procesu walcowania monotonicznego i ze zmianą kierunku (walcowanie krzyżowe).

Zgłady z miedzi przed obserwacjami mikroskopowymi trawiono odczynnikami ( $100\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O}$ ,  $10\text{ cm}^3\text{ HCl}$ ,  $5\text{ g FeCl}_3$ ), a ze stopu Inconel 825 – ( $30\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O}$ ,  $20\text{ cm}^3\text{ HCl}$ ,  $10\text{ g FeCl}_3$ ).

Pomiary mikrotwardości metodą Vickersa po każdym przepuszczeniu walcowniczym wykonano na twardościomierzu Micromet 2104 przy obciążeniu 4,9 N.

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.1. Walcowanie monotoniczne

Wyniki badań walcówek po każdym z przepustów pokazano w tab. 3.

*plastic flow. However, regardless of the reasons, a deformation path change – anticipated by clearly configured dislocation structure – might lead to localization of strain (which is a dynamic phenomenon) and certain structural effects in final products [15–17].*

*Hommel Etamic Turbo Wave V7 36 profilometer was used to measure surface roughness and to determine roughness profiles as well as  $R_a$ ,  $R_t$  i  $R_z$  parameters. Paper [4] contains roughness profile graphs and roughness parameters for copper and Inconel 825 nickel alloy after flow forming. In this paper, test results of monotonic rolling and rolling with change of direction (cross rolling) for copper and Inconel 825 will be presented.*

*Prior to observations, copper microsections were etched with etchant ( $100\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O}$ ,  $10\text{ cm}^3\text{ HCl}$ ,  $5\text{ g FeCl}_3$ ) and Inconel 825 microsections with etchant ( $30\text{ cm}^3\text{ H}_2\text{O}$ ,  $20\text{ cm}^3\text{ HCl}$ ,  $10\text{ g FeCl}_3$ ).*

*Microhardness was measured by the Vickers method after each roll pass with Micromet 2104 hardness tester at a load of 4,9N.*

### 3. RESULTS

#### 3.1. Monotonic rolling

*Test results for rolled samples after each pass are shown in Tab. 3.*

Tab. 3. Wyniki badań walcowania ze zmianą drogi odkształcenia

Tab. 3. Results of rolling with deformation path change

Material Material	Numer przepustu Number of pass	Nastawy Set gap [mm]	Wielkość szczeliny Real proces gap [mm]	Grubość próbki Thickness of sample [mm]	Gniot sumaryczny Total deformation [%]
Miedź / Copper	1	2,4	1,8	1,7 <sub>-0,05</sub>	32
	2	2,0	1,2	1,1 <sub>-0,05</sub>	57
Inconel 825 / $g_0 = 2\text{ mm}$	1	1,9	1,5	1,4 <sub>-0,05</sub>	29
	2	1,5	0,9	0,9 <sub>-0,05</sub>	58
Inconel 825 / $g_0 = 3\text{ mm}$	1	2,5	2,0	2,0 <sup>+0,05</sup>	33
	2	1,8	1,3	1,2 <sub>-0,05</sub>	62

W tab. 4 i 5 pokazano całkowite gnioty uzyskane podczas walcowania wzdłużnego oraz rzeczywiste wyniki grubości walcówki. Dla próbek 1.2 i 2.2 z miedzi zrealizowano przepust przy szczeliny 2,4 mm dwukrotnie (celem kalibracji wymiaru grubości próbek).

*Tab. 4 and 5 contain total deformation for longitudinal rolling and actual thickness results of the rolled samples. Copper specimens 1.2 and 2.2 were subjected to a pass with a 2.4 mm aperture twice (in order to calibrate their thickness).*

Tab. 4. Grubości walcówek i rzeczywiste gnioty całkowite otrzymane w badaniach walcowania miedzi w poszczególnych przepustach

*Tab. 4. Thickness of the drawpieces and actual total deformation during copper rolling in each pass*

Numer przepustu <i>Number of pass</i>	Próbka <i>Specimen</i>	Wielkość szczeliny [mm] <i>Real gap [mm]</i>	Grubość [mm] <i>Thickness [mm]</i>	Gniot sumaryczny [%] <i>Total deformation [%]</i>
1	1.1	2,4	1,55 <sup>+0,05</sup>	36
	2.1		1,55 <sup>+0,10</sup>	34
2	1.1	2,3	1,35 <sup>+0,07</sup>	46
	2.1		1,35 <sup>+0,12</sup>	44
1	1.2	2,4	1,80 <sup>+0,04</sup>	26
	2.2		1,80 <sup>+0,06</sup>	24
2	1.2	2,4	1,55 <sup>+0,04</sup>	36
	2.2		1,55 <sup>+0,08</sup>	35
3	1.2	2,3	1,35 <sup>+0,05</sup>	46
	2.2		1,35 <sup>+0,10</sup>	45
4	1.2	1,7	0,70 <sup>+0,06</sup>	82
	2.2		0,70 <sup>+0,08</sup>	83

Tab. 5. Grubości walcówek i rzeczywiste gnioty całkowite otrzymane w badaniach walcowania stopu Inconel 825 w poszczególnych przepustach

*Tab. 5. Thickness of the drawpieces and actual total deformation during Inconel 825 rolling in each pass*

Numer przepustu <i>Number of pass</i>	Próbka <i>Specimen</i>	Wielkość szczeliny [mm] <i>Real gap [mm]</i>	Grubość [mm] <i>Thickness [mm]</i>	Gniot sumaryczny [%] <i>Total deformation [%]</i>
1	3.1	2,4	1,75 <sup>+0,06</sup>	41
	3.2		1,75 <sup>+0,04</sup>	42
2	2.1	1,9	1,35 <sup>+0,07</sup>	30
	2.2		1,35 <sup>+0,03</sup>	31
	3.1		1,25 <sup>+0,02</sup>	58
	3.2		1,25 <sup>+0,05</sup>	57
3	2.1	1,7	0,95 <sup>+0,04</sup>	52
	2.2		0,95 <sup>+0,05</sup>	53

W tabeli 6 pokazano uśrednione wartości chropowatości dla badanych materiałów. Zarówno dla miedzi jak i stopu Inconel 825 chropowatość próbek po walcowaniu jest zbliżona do chropowatości po procesie ZOWW. Największe zmiany chropowatości w stosunku do stanu wyjściowego obserwuje się dla stopu Inconel 825 w procesie walcowania, a dla miedzi w procesie ZOWW.

*Tab. 6 shows average roughness values for the tested materials. For both, copper and Inconel specimens, the roughness after rolling is similar to the roughness after flow forming. The biggest changes of roughness in relation to the initial state are observed for Inconel 825 during the process of rolling and for copper during flow forming.*

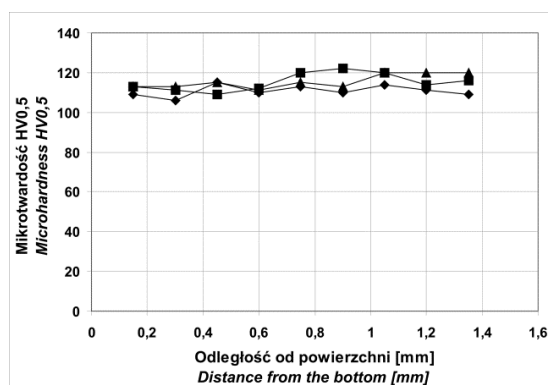
Tab 6. Uśrednione wyniki badań chropowatości dla materiału miedzi i stopu Inconel 825

Tab. 6. Average results of roughness tests for copper and Inconel 825

Etap procesu / Process stage	Materiał / Material	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
Stan wyjściowy / Initial state	Miedź / Copper	0,394	10,057	6,564
Zgniatanie obrotowe / Flow forming		0,278	2,713	1,999
Walcowanie / Rolling		0,558	7,533	4,966
Stan wyjściowy / Initial state	Inconel 825	4,328	28,531	24,980
Zgniatanie obrotowe / Flow forming		1,321	8,627	6,628
Walcowanie / Rolling		0,569	6,781	5,910

Podobnie jak w próbkach z miedzi zgniatanych obrotowo [6], w walcówkach nie zauważa się różnicy twardości przy krawędzi i we wnętrzu. Przykładowy wykres mikrotwardości dla próbki 1.1 (miedź) zamieszczono na rys. 6. Wyniki mikrotwardości są zbliżone do twardości próbek zgniecionych obrotowo, a ich średnia mikrotwardość wynosi 111 HV0,5. W stosunku do materiału wyjściowego wzrosła ona o ok. 40 HV (przy średniej wartości dla materiału wyjściowego wynoszącej 75 HV0,5).

Similarly to copper samples subjected to flow forming [6], in the products of rolling differences in hardness at the edges and within the specimens are not observed. Fig. 6 shows an exemplary graph of microhardness for specimen 1.1 (copper). Microhardness test results are similar to the hardness of specimens subjected to flow forming and the average microhardness value is 111 HV0.5. In comparison with the initial material the microhardness value grew by approximately 40 HV (with average microhardness for the initial material being 75 HV0.5).

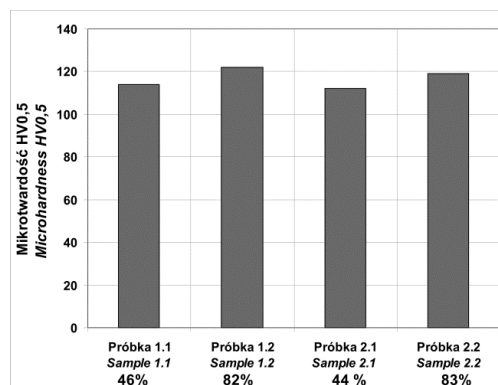


Rys. 6. Rozkład mikrotwardości miedzi po walcowaniu ze zgniotem 46%; próbka nr 1.1 do walcowania wycięta wzdłuż kierunku prostopadłego w stosunku do kierunku walcowania arkusza blachy

Fig. 6. Distribution of microhardness test results for copper after rolling with 46% deformation; specimen no 1.1 cut out for rolling along cross-sectional direction in relation to the direction of the sheet metal rolling

W stosunku do badań próbek zgniatanych obrotowo [6] na rys. 7 zauważa się nieznaczny wzrost właściwości mechanicznych przy większych gniotach walcówki (próbki 1.2 i 2.2 – patrz tab. 4) – w pewnym stopniu odmiennie aniżeli w operacjach zgniatania, gdzie wraz z kolejnymi operacjami mikrotwardość jest właściwie stała (po pierwszej operacji wynosiła średnio 110 HV0,5, a po drugiej 112 HV0,5).

In relation to tests conducted for specimens subjected to flow forming [6], in Fig. 7 a slight growth of mechanical properties of rolled samples at increased deformation can be observed (specimens 1.2 and 2.2 – compare with Tab. 4), which is different than during flow forming, where microhardness remains practically unchanged after each stage of the procedure (and equals on average 110 HV0.5 after the first stage and 112 HV0.5 after the second).

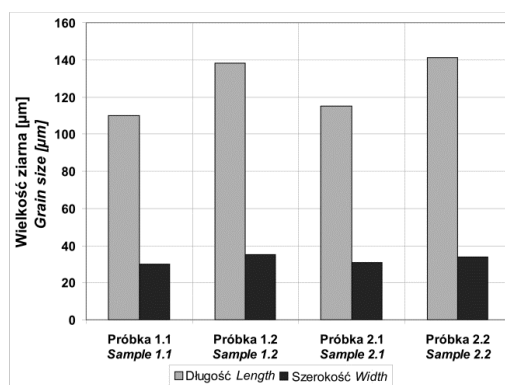


Rys. 7. Mikrotwardość miedzi w funkcji gniotu walcowniczego

Fig. 7. Microhardness of copper as a function of deformation after rolling

Na rys. 8 zawarto średnie wymiary ziarna walcówek dla poszczególnych próbek. Widoczne są różnice w odniesieniu do próbek zgniecionych obrotowo (w walcówkach ziarna są dłuższe), przykładowo średnia umowna długość ziarna po pierwszej operacji ZOWW wynosiła  $87,7 \mu\text{m}$ , a po drugiej  $97,5 \mu\text{m}$ . Prawdopodobnie wiąże się to z odmiennością mechanizmów odkształcenia podczas monotonicznego (klasycznego) walcowania i zgniatania obrotowego [7].

Fig. 8 shows the average grain sizes for each specimen. Some differences in relation to specimens subjected to flow forming can be observed (grains in rolled samples are bigger), for instance, average stipulated grain size after the first stage of flow forming equaled  $87,7 \mu\text{m}$  and  $97,5 \mu\text{m}$  after the second stage. This is probably a result of different mechanisms behind monotonic (conventional) rolling and flow forming [7].



Rys. 8. Średnie wymiary ziarna dla walcówek z miedzi

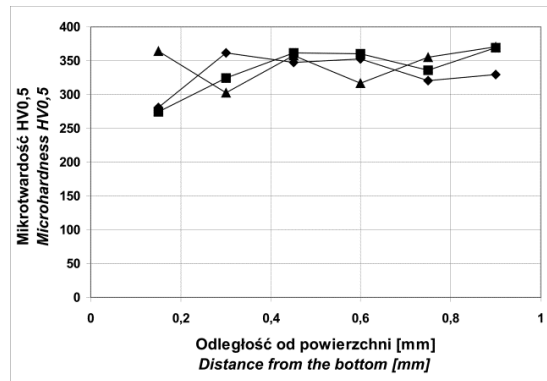
Fig. 8. Average grain sizes for copper drawpieces

Analogicznie jak w przypadku miedzi, wyniki mikrotwardości próbki 2.1 stopu Inconel 825 (rys. 9) są zbliżone do mikrotwardości próbek zgniecionych obrotowo (średnia mikrotwardość  $330 \text{HV}0,5$ , tj. maksymalna mikrotwardość wynosi  $380 \text{HV}0,5$  dla posuwu  $175 \text{mm/min}$ , a minimalna  $280 \text{HV}0,5$  dla posuwu  $350 \text{mm/min}$ ). Powtarza się zasada, że mikrotwardość stabilizuje się na całej grubości walcówki (przypuszczano natomiast, że twardość przypowierzchniowa będzie jednak znacznie wyższa). Średnia

Similarly to copper, the microhardness test results for specimen 2.1 made of Inconel 825 (Fig. 9) are homogenous with microhardness of flow formed specimens (average microhardness of  $330 \text{HV}0,5$ , i.e. maximal microhardness equals  $380 \text{HV}0,5$  for a feed of  $175 \text{mm/min}$ , and minimal microhardness equals  $280 \text{HV}0,5$  for a feed of  $350 \text{mm/min}$ ). That confirms the rule, which says that microhardness gets stabilized throughout the rolled sample (although it was expected to be much higher at the edges). Average micro-

mikrotwardość dla stopu Inconel 825 przed obróbką plastyczną wynosiła 179 HV0,5.

hardness for Inconel 825 before plastic deformation was 179 HV0,5.

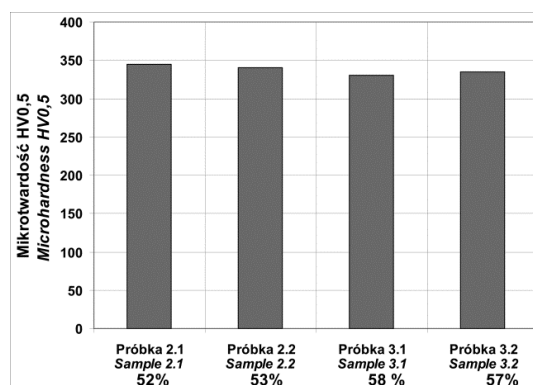


Rys. 9. Rozkład mikrotwardości stopu Inconel 825 po walcowaniu ze zgniotem 44%; próbka nr 2.1 do walcowania wycięta wzdłuż kierunku prostopadłego w stosunku do kierunku walcowania arkusza blachy

Fig. 9. Distribution of microhardness test results for Inconel 825 after rolling with 44% draft; specimen no 2.1 cut out for rolling along cross-sectional direction in relation to the direction of the sheet metal rolling

Mikrotwardość dla wszystkich walcówek ze stopu Inconel 825 w funkcji gniotu walcowniczego zamieszczono na rys. 10. Nieco odmiennie, w stosunku do walcówek z miedzi, niezależnie od próbki i jej gniotu sumarycznego, mikrotwardość próbek ze stopu Inconel pozostaje niemal na stałym poziomie (ok. 340 HV0,5). Ponadto wyniki szczegółowe mikrotwardości dla wszystkich próbek ze stopu Inconel 825 wskazują, tak jak w przypadku próbek z miedzi, że mikrotwardość jest niemal stała na przekroju – brak dostrzegalnych różnic w mikrotwardości pomiędzy strefami przypowierzchniowymi (przy krawędzi), a wewnętrznymi strefami próbek.

Microhardness as a function of deformation for all rolled samples made of Inconel 825 is shown in Fig. 10. Unlike copper rolled samples, regardless of the specimen and its total deformation, microhardness of the Inconel 825 specimens remains virtually at the same level (around 340 HV0,5). Moreover, detailed results of microhardness tests for all specimens made of Inconel 825 indicate, like in the case of copper specimens, that the values of cross-sectional microhardness are practically constant – no noticeable differences in microhardness between the near-surface areas (close to the edges) and within the samples were found.



Rys. 10. Mikrotwardość stopu Inconel 825 w funkcji gniotu walcowniczego

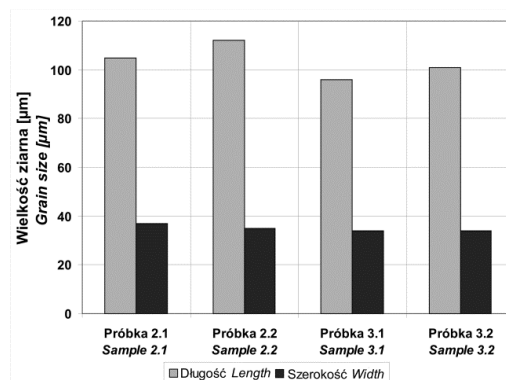
Fig. 10. Microhardness of Inconel 825 as a function of deformation after rolling

W stosunku do walcówek z miedzi zauważalna jest stabilizacja tej właściwości, tak jak w prób-

In copper rolled samples this particular property seems to be stable, like in the specimens sub-

kach kształtowanych w procesie ZOWW. Mikro-twardość jednak nie może być jedyną miarą dokładności modelowania procesu ZOWW w próbach walcowania monotonicznego. Nawet w przypadku konwencjonalnego tłoczenia wytłoczki cylindrycznej z miedzi i następnie zgniatania obrotowego [3, 4, 6] wzrost mikro-twardości też jest nieznaczny (albo nie ma go wcale). Dlatego też ocena na podstawie pomiarów elementów struktury (ziaren) i mikro-twardości, o podobieństwie metod walcowania i ZOWW, jest znacznie lepsza.

Średnie wymiary ziarna walcówek dla poszczególnych próbek ze stopu Inconel 825 zamieszczono na rys. 11. Wyniki różnią się od tych uzyskanych dla próbek zgniecionych obrotowo (po drugiej operacji średnia umowna długość ziarna wynosiła ok. 115  $\mu\text{m}$ ), jak również różnią się w stosunku do walcówki z miedzi (rys. 8). Z jednej strony wynika to z różnic w obu materiałach: miedzi i stopu niklu Inconel 825, a z drugiej – z różnic w mechanizmach deformacji między ZOWW a monotonicznym walcowaniem.



Rys. 11. Średnie wymiary ziarna dla walcówek ze stopu Inconel 825

Fig. 11. Average grain sizes for Inconel 825 drawpieces

Na podstawie analizy wyników badań mikro-twardości próbek z walcowania wzdłużnego (w stosunku do próbek z procesu ZOWW) można przeprowadzić modelowane fizyczne procesu zgniatania obrotowego. Różnice w mechanizmach odkształcenia są zbyt znaczne, co rzutuje na strukturę i wielkość ziarn w materiale. Poza tym nie uwzględniając mającej miejsce w procesie ZOWW zmiany drogi odkształcenia, która determinuje szereg zmian w strukturze materiałów odkształczanych plastycznie, po-

jected to flow forming. However, microhardness can not be the only measure of accuracy in modelling of the flow forming process by monotonic rolling. Even when a cylindrical copper drawpiece is first rolled conventionally and subsequently subjected to flow forming [3, 4, 6] the increase of microhardness is also small (or none at all). Therefore an evaluation of similarities between rolling procedures and flow forming based on the measurements of structural elements (grains) and microhardness tests is much more accurate.

Average grain sizes for individual rolled samples made of Inconel 825 are shown in Fig. 11. The results differ not only from those observed for specimens subjected to flow forming (after the second stage of the process grain length was around 115  $\mu\text{m}$ ), but also from results for copper rolled samples (Fig. 8). It is a consequence of the differences between the both materials: copper and Inconel 825 on the one hand, and on the other the effect of different deformation mechanisms behind flow forming and monotonically rolling.

Based on the analysis of test results regarding microhardness of specimens subjected to longitudinal rolling (in relation to specimens subjected to flow forming) modelling of the physical process of flow forming can not be performed. The differences in the mechanisms behind the deformation processes are too significant, which affects the structure and grain sizes of the material. What is more, if the deformation path change during the flow forming process and its influence on a number of structural changes in mate-



mija się ważne z punktu widzenia finalnych właściwości aspekty procesu. Dlatego w toku dalszych badań zrealizowano eksperyment w postaci prób walcowania ze zmianą drogi odkształcenia, aby lepiej odzwierciedlić rzeczywiste warunki, które mają miejsce w procesie ZOWW.

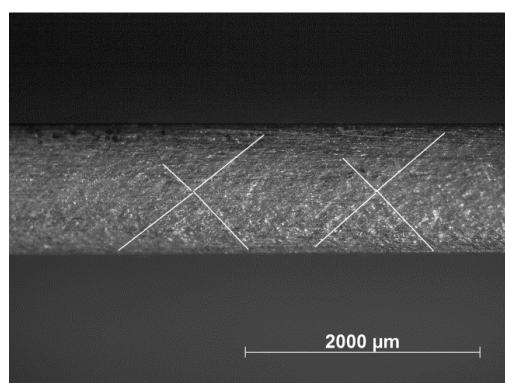
### 3.2. Badania walcowania ze zmianą drogi odkształcenia

Rys. 12–14 prezentują topografię powierzchni bocznych walcówek kształtowanych z wymuszoną zmianą kierunku odkształcenia, a rys. 15–17 obserwacje mikrostrukturalne. Zarówno powierzchnia próbki miedzianej (rys. 12), jak i stopu Inconel 825 (rys. 13 i 14) charakteryzuje się silną lokalizacją odkształcenia.

*materials undergoing plastic deformation is not taken into account, important (in terms of final properties) aspects of the process are being ignored. That is why, in further research, experimental rolling with deformation path change was undertaken in order to reflect the actual conditions of the flow forming process more accurately.*

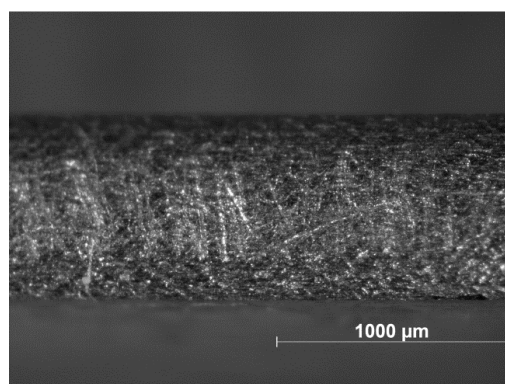
### 3.2. Research on rolling with deformation path change

*Fig. 12–14 show the topography of side-surfaces of the rolled samples deformed with imposed change of deformation direction, and Fig. 15–17 their microstructural observations. Both surfaces, of copper (Fig. 12) and Inconel 825 (Fig. 13 and 14), are characterized by strong strain localization.*



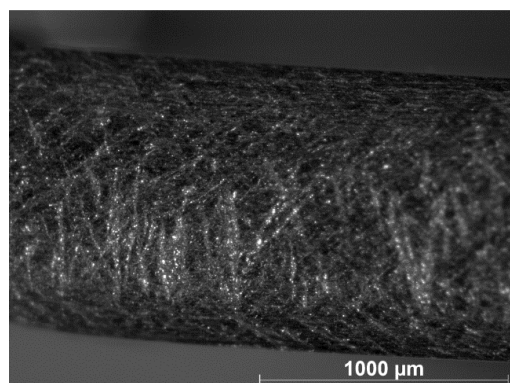
Rys. 12. Topografia powierzchni bocznej miedzi po drugim przebiegu (z wymuszoną zmianą schematu odkształcenia); białe linie odwzorowują położenie pasm ścinania

*Fig. 12. Side-surface topography of copper after second pass (with imposed change of deformation scheme); white lines reflect the position of shear bands*



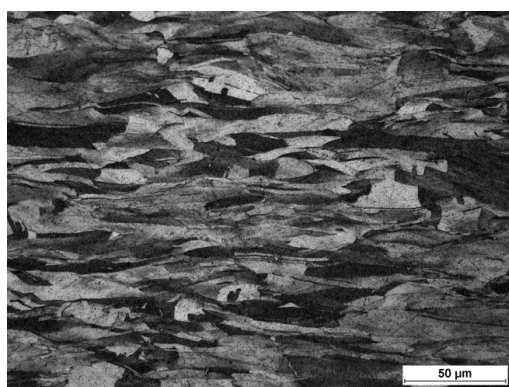
Rys. 13. Topografia powierzchni bocznej walcówki ze stopu Inconel 825 o grubości wyjściowej 2 mm po drugim przebiegu (z wymuszoną zmianą drogi odkształcenia)

*Fig. 13. Side-surface topography of Inconel 825 drawpiece with initial thickness of 2 mm after second pass (with imposed change of deformation path)*

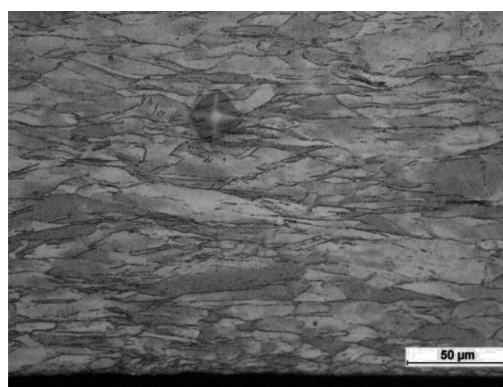


Rys. 14. Topografia powierzchni bocznej walcówki ze stopu Inconel 825 o grubości wyjściowej 3 mm po drugim przepuście (z wymuszoną zmianą drogi odkształcenia)

*Fig. 14. Side-surface topography of Inconel 825 drawpiece with initial thickness of 3 mm after second pass (with imposed change of deformation path)*



a)



b)

Rys. 15. Mikrostruktury miedzi: a) po drugim przepuście walcowniczym, b) po walcowaniu obrotowym; obserwacje wzdłuż kierunku walcowania i zgniatania obrotowego

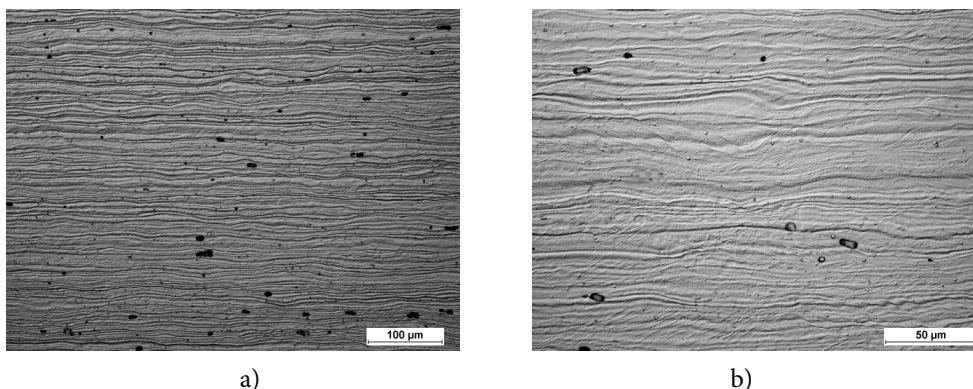
*Fig. 15. Copper microstructures: a) after second rolling pass and b) after flow forming; observations longitudinal to rolling and flow forming direction*

Na rys. 15b zamieszczono typową mikrostrukturę miedzi po zgniataniu obrotowym. Szczegółowe wyniki zamieszczono w pracy [5]. Porównanie mikrostruktur miedzi po zgniataniu obrotowym i walcowaniu ze zmianą schematu odkształcenia pozwala stwierdzić, że skutki lokalizacji odkształcenia w pasmach ścinania są analogiczne. Mikrostruktury te są jednak odmienne niż po walcowaniu monotonicznym. Świadczy to o poprawności modelowania fizycznego procesu zgniatania obrotowego. Zatem wykonanie prostszego eksperymentu walcowania krzyżowego i obserwacje strukturalne pozwalają na uzyskanie informacji o złożonym procesie zgniatania obrotowego. Modelowanie fizyczne jest wykonywane, aby łatwiej (a czasami w sposób jedyny) uzyskać informacje o zjawisku – mechanizmie procesu trudniejszego.

*Typical microstructure of copper after flow forming was presented in Fig. 15a. Detailed results were included in work [5]. A comparison between copper specimens after flow forming and after rolling with deformation scheme change indicates that the effects of strain localization in shear bands are analogous. However, these microstructures differ in relation to specimens subjected to monotonic rolling, which means that the physical modelling of flow forming was correct. A simpler experiment of cross rolling and structural observations are, therefore, sufficient to obtain information about the complex process of flow forming. Physical modelling is an easier (and sometimes the only) way to learn about a given phenomenon – the mechanism behind a more sophisticated process.*

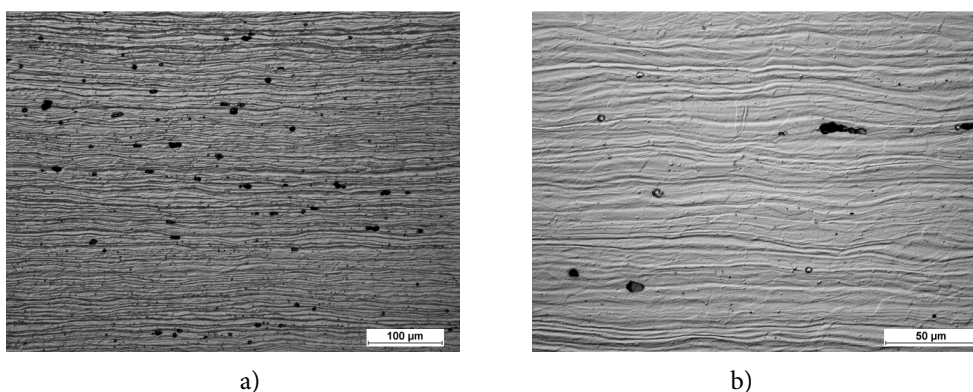
Rys. 16 i 17 przedstawiają wyniki obserwacji mikrostrukturalnych próbek pobranych z walcówek ze stopu Inconel 825. Dostrzegalne są skutki lokalizacji odkształcenia w pasmach ścinania (elementy struktury włóknistej można uznać za „markery”, a ich ugięcia, przesunięcia świadczą o zlokalizowanym plastycznym płynięciu). Na rys. 18 przedstawiono wykresy porównawcze wymiarów ziaren miedzi i stopu Inconel 825 po zgniataniu obrotowym i po walcowaniu ze zmianą drogi odkształcenia. Dla miedzi wymiary ziarna są niezależne od sposobu odkształcenia, natomiast dla stopu Inconel 825 widoczne jest zróżnicowanie wielkości ziarna. Oznacza to, że dla miedzi proces walcowania ze zmianą schematu odkształcenia w sposób bardziej dokładny odzwierciedla skutki zgniatania obrotowego niż dla stopu Inconel 825.

*Fig. 16 and 17 present the results of microstructural observations of specimens taken from rolled samples made of Inconel 825. The effects of strain localization in shear bands are noticeable (the elements of fibrous structure can be treated as markers, and their deflections, displacements indicate localized plastic flow). Fig. 18 shows graphs with comparative data on grain sizes in copper and Inconel 825 after flow forming and after rolling with deformation path change. For copper, grain sizes are not dependent on the deformation process, however, for Inconel 825 the grain sizes vary. It means that rolling with deformation path change reflects the effects of flow forming more accurately for copper than it does for the Inconel 825 alloy.*



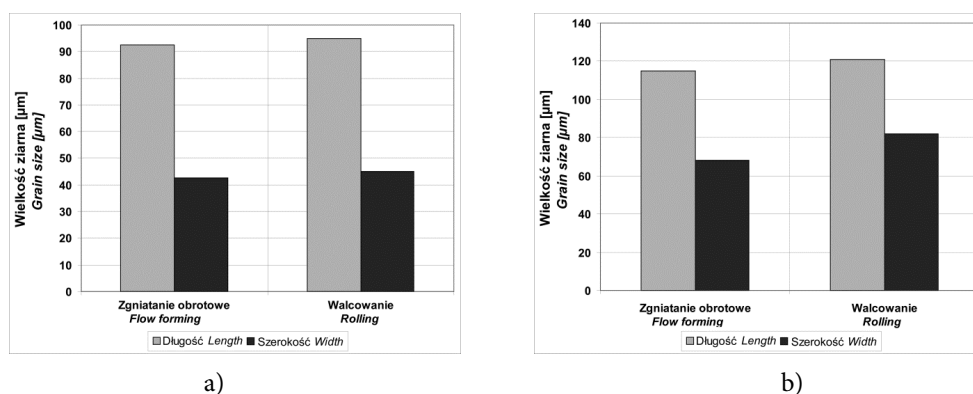
Rys. 16. Mikrostruktury stopu Inconel 825 po drugim przebiegu walcowniczym (obserwacje wzdłuż kierunku walcowania); a) i b) różne powiększenia

*Fig. 16. Inconel 825 microstructures after second rolling pass (observations longitudinal to rolling direction); a) and b) – different magnitudes*



Rys. 17. Mikrostruktury stopu Inconel 825 po drugim przebiegu walcowniczym (obserwacje w poprzek kierunku walcowania); a) i b) różne powiększenia

*Fig. 17. Inconel 825 microstructures after second rolling pass (observations transverse to rolling direction); a) and b) – different magnitudes*

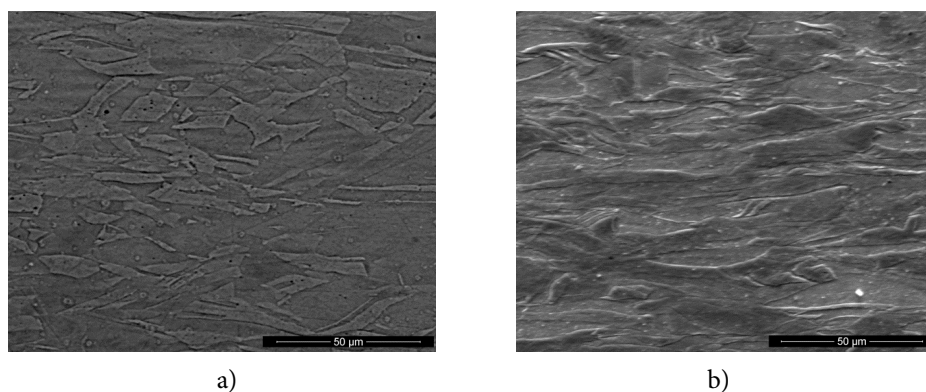


Rys. 18. Zestawienie wielkości ziarna dla miedzi (a) i stopu Inconel 825 (b) po zgniataniu obrotowymi po walcowaniu ze zmianą drogi odkształcenia

Fig. 18. Comparison of grain sizes for copper (a) and Inconel 825 (b) after flow forming and after rolling with deformation path change

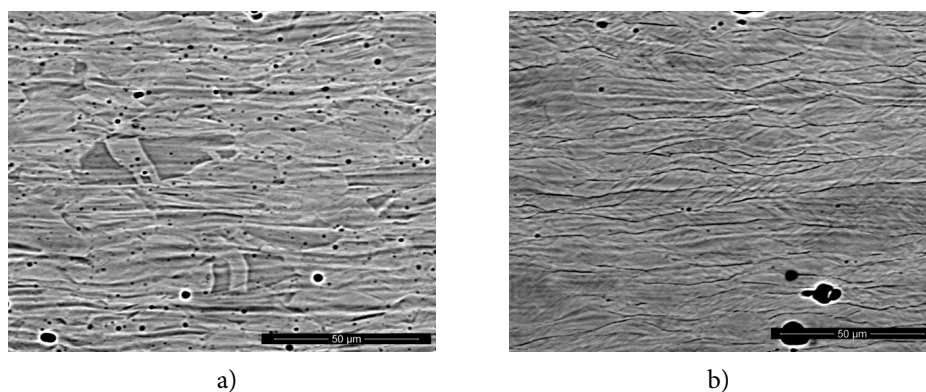
Wyniki obserwacji przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (rys. 19 i 20) potwierdzają lokalizację odkształcenia obserwowaną przy użyciu mikroskopu optycznego.

Scanning electron microscope SEM observations (Fig. 19 and 20) confirm the strain localization observed using an optical microscope.



Rys. 19. Mikrostruktury SEM miedzi kształtowanej ze zmianą drogi odkształcenia: a) kierunek poprzeczny, b) kierunek wzdłużny

Fig. 19. SEM microstructures for copper deformed with deformation path change: a) cross-sectional direction, b) longitudinal direction



Rys. 20. Mikrostruktury SEM stopu Inconel 825 kształtowanego ze zmianą drogi odkształcenia: a) kierunek poprzeczny, b) kierunek wzdłużny

Fig. 20. SEM microstructures for Inconel 825 deformed with deformation path change: a) cross-sectional direction, b) longitudinal direction

#### 4. PODSUMOWANIE

W miedzi i stopie Inconel 825 wraz ze wzrostem gniotu sumarycznego mikrotwardość walcówek z procesu monotonicznego rośnie nieznacznie albo wręcz się stabilizuje (stop Inconel 825). Próbki walcowane i zgniatane obrotowo przy podobnym gnocie sumarycznym osiągają podobną mikrotwardość. Analogicznie jak w próbkach zgniatanych, nie zauważa się dla materiału walcówek różnicy mikrotwardości przy krawędzi i we wnętrzu próbek. Różnice, które mają miejsce w zaobserwowanych średnich wielkościach ziaren między klasycznie wytworzonymi walcówkami i próbkami z procesu ZOWW są jednak znaczne. Stąd należy uznać, że proces walcowania wzdłużnego nie jest odpowiedni do modelowania fizycznego procesu ZOWW.

W próbkach po walcowaniu ze zmianą drogi odkształcenia i zgniatanych obrotowo nie zauważa się znaczących różnic w średnich wielkościach ziaren. Również w obydwu rodzajach materiału widoczna jest lokalizacja odkształcenia w pasmach ścinania – choć płaszczyzny ścinania są lepiej widoczne dla stopu Inconel 825 niż dla walcowanej miedzi. Struktura ta jest jednak znacznie różna od struktury w klasycznych walcówkach, co świadczy o prawidłowym modelowaniu fizycznym procesu zgniatania obrotowego. Występuje bowiem nie tylko zgodność mikrotwardości, ale również, co ważniejsze, zgodność w zakresie strukturalnym.

Zjawisko lokalizacji deformacji zarówno w procesach walcowania krzyżowego, jak i w procesach ZOWW może mieć zatem typowo przemysłowe zastosowania. Dzięki bowiem możliwości eliminacji międzyoperacyjnej obróbki cieplnej z procesu wytwarzania, szczególnie w przypadku drogich materiałów (np. stopów niklu), ekonomika procesu ZOWW wzrasta dość znacznie.

#### LITERATURA

- [1] Pawlicki M., M. Rozmysłowicz, M. Pieszak. 2016. „Badania walcowania pakietowego aluminium oraz tłoczenia próbek z materiału o strukturze ultra drobnej”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 45–58.

#### 4. CONCLUSIONS

*For copper and Inconel 825 drawpieces microhardness values increase insignificantly or even stabilize (Inconel 825) with the increase of deformation. Specimens subjected to rolling and flow forming reach similar microhardness values at similar total deformation. Differences in microhardness near the edges and inside the rolled samples were not noticed, similarly to the flow formed specimens. However, the differences in average grain sizes between conventionally produced rolled samples and flow formed specimens are significant. Therefore, longitudinal rolling can not be treated as adequate for physical modelling of the flow forming process.*

*Between specimens subjected to rolling with deformation path change and flow forming significant differences in average grain sizes were not observed. Strain localization in shear bands is also visible in both materials, although shear planes are more noticeable in Inconel 825 than in rolled copper. However, its structure is clearly different than the structure of conventional rolled samples, which proves that the physical modelling of the flow forming process is in this case correct. Consistency in both, microhardness values and, more importantly, structural parameters were observed.*

*Strain localization during cross rolling as well as during flow forming might have a typically industrial application. The possibility to eliminate mid-operational heat-treatment from the production process, particularly in the case of expensive materials (such as nickel alloys), significantly increases cost-effectiveness of the flow forming procedure.*

#### REFERENCES

- [1] Pawlicki M., M. Rozmysłowicz, M. Pieszak. 2016. „Studies of accumulative roll bonding of aluminum and stamping of ultra-fine grain specimens of material”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 45–58.

- [2] Pawlicki M., M. Pieszak, T. Drenger, J. Borowski. 2015. „Cold upset forging joining of ultra-fine-grained aluminium and copper”. *Journal of Material Processing Technology* 223: 193–202.
- [3] Pawlicki M., W. Bochniak. 2014. „Strukturalne przyczyny stabilizacji mikrotwardości miedzi poddanej procesowi zgniatania obrotowego”. *Archives of Metallurgy and Materials* 59 (2): 537–543.
- [4] Pawlicki M. 2013. „Plastyczne kształtowanie miedzi w technologii zgniatania obrotowego”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (1): 31–50.
- [5] Drenger T., J. Wiśniewski, M. Pawlicki, Z. Ulatowski, T. Gadek, L. Nowacki, S. Frąckowiak. 2011. „Badania procesów tłoczenia i zgniatania obrotowego wytłoczek z materiału trudno odkształcalnego Alloy 825”. *Obróbka Plastyczna Metali* 22 (3): 177–189.
- [6] Pawlicki M. 2013. „Plastyczne kształtowanie metali w technologii zgniatania obrotowego”. Rozprawa doktorska. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza.
- [7] Stalony-Dobrzański F., W. Bochniak. 2005. „Rola pasm ścinania w kształtowaniu obrazu tekstury odkształcanych stopów miedzi”. *Archives of Metallurgy and Materials* 50 (4): 1089–1102.
- [8] Bochniak W., K. Pantoł 2008. „Structure of copper subjected to changes of the loading scheme during rolling”. *Journal of Materials Processing Technology* 208: 366–371.
- [9] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. „Visco-plastic flow of metal in dynamic conditions of complex strain scheme”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 42: 2881–2897.
- [10] Bochniak W., A. Korbel. 2003 „KOBO type forming: forging of metals under complex conditions of the process”. *Journal of Material Processing Technology* 134: 120–134.
- [11] Al-Samman T., G. Gottstein. 2008 „Influence of strain path change on the rolling behavior of twin roll cast magnesium alloy”. *Scripta Materialia* 59: 760–763.
- [12] Bochniak W., K. Marszowski, A. Korbel. 2005. „Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method”. *Journal of Materials Processing Technology* 169: 44–53.
- [13] Sakharova N.A., J.V. Fernandes. 1995. „Strain path change effect on dislocation microstructure of multicrystalline copper sheets”. *Materials Chemistry and Physics* 98: 44–50.
- [14] Korbel A., W. Bochniak. 1995. „The structure based design of metal forming operations”. *Journal of Materials Processing Technology* 53: 229–237.
- [15] Pięła K., L. Błaż, M. Jaskowski. 2013. „Wpływ parametrów wyciskania metodą KOBO na własności mechaniczne i strukturę aluminium”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (3): 683–689.
- [16] Bochniak W., K. Pięła, S. Vinarski, M. Łagoda. 2013. „Mechanical properties of tungsten wires after cyc-
- [2] Pawlicki M., M. Pieszak, T. Drenger, J. Borowski. 2015. „Cold upset forging joining of ultra-fine-grained aluminium and copper”. *Journal of Material Processing Technology* 223: 193–202.
- [3] Pawlicki M., W. Bochniak. 2014. „Mechanical and structural behavior of copper subjected to the flow forming process”. *Archives of Metallurgy and Materials* 59 (2): 537–543.
- [4] Pawlicki M. 2013. „Metal forming of copper in flow forming technology”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (1): 31–50.
- [5] Drenger T., J. Wiśniewski, M. Pawlicki, Z. Ulatowski, T. Gadek, L. Nowacki, S. Frąckowiak. 2011. „Investigation of the processes of stamping and flow forming of drawpieces made of hard-to-deform material, Alloy 825”. *Obróbka Plastyczna Metali* 22 (3): 177–189.
- [6] Pawlicki M. 2013. „Metal forming in flow forming technology”. PhD thesis. Kraków: AGH – University of Science and Technology.
- [7] Stalony-Dobrzański F., W. Bochniak. 2005. „Role of shear bands in forming the texture image of deformed copper alloys”. *Archives of Metallurgy and Materials* 50 (4): 1089–1102.
- [8] Bochniak W., K. Pantoł 2008. „Structure of copper subjected to changes of the loading scheme during rolling”. *Journal of Materials Processing Technology* 208: 366–371.
- [9] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. „Visco-plastic flow of metal in dynamic conditions of complex strain scheme”. *Metallurgical and Materials Transactions A* 42: 2881–2897.
- [10] Bochniak W., A. Korbel. 2003 „KOBO type forming: forging of metals under complex conditions of the process”. *Journal of Material Processing Technology* 134: 120–134.
- [11] Al-Samman T., G. Gottstein. 2008 „Influence of strain path change on the rolling behavior of twin roll cast magnesium alloy”. *Scripta Materialia* 59: 760–763.
- [12] Bochniak W., K. Marszowski, A. Korbel. 2005. „Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method”. *Journal of Materials Processing Technology* 169: 44–53.
- [13] Sakharova N.A., J.V. Fernandes. 1995. „Strain path change effect on dislocation microstructure of multicrystalline copper sheets”. *Materials Chemistry and Physics* 98: 44–50.
- [14] Korbel A., W. Bochniak. 1995. „The structure based design of metal forming operations”. *Journal of Materials Processing Technology* 53: 229–237.
- [15] Pięła K., L. Błaż, M. Jaskowski. 2013. „Effects of extrusion parameters by KoBo method on the mechanical properties and microstructure of aluminum”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (3): 683–689.
- [16] Bochniak W., K. Pięła, S. Vinarski, M. Łagoda. 2013. „Mechanical properties of tungsten wires after cyc-



- ling deformation treatment”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (9–12): 1955–1959.
- [17] Stolyarov V.V., Y.T. Zhu, G.I. Raab, A.I. Zharikov, R.Z. Valiev. 2004. „Effect of initial microstructure on the microstructural evolution and mechanical properties of Ti during cold rolling”. *Materials Science and Engineering A* 385: 309–313.
- ling deformation treatment”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (9–12): 1955–1959.
- [17] Stolyarov V.V., Y.T. Zhu, G.I. Raab, A.I. Zharikov, R.Z. Valiev. 2004. „Effect of initial microstructure on the microstructural evolution and mechanical properties of Ti during cold rolling”. *Materials Science and Engineering A* 385: 309–313.

