

Prof. dr hab. inż. Franciszek GROSMAN

Politechnika Śląska, Gliwice

Dr inż. Andrzej PLEWIŃSKI, dr inż. Stanisław ZIÓŁKIEWICZ

Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

# Niekonwencjonalne procesy kształtowania objętościowego

## *Non-conventional bulk metal forming processes*

### **Streszczenie**

Zapotrzebowanie na materiały o lepszych właściwościach użytkowych i nowe bądź ulepszone, ze względów ekonomicznych i ekologicznych, technologie ich wytwarzania, inspirują do poszukiwań nowych materiałów i nowych technologii ich otrzymywania. Badania objęły analizę wpływu drogi odkształcenia na parametry siłowo-energetyczne oraz strukturę materiału w procesach ściskania z równoczesnym lub sekwencyjnym skręcaniem. Uzyskane wyniki były podstawą do opracowania projektu i wykonania walcarki umożliwiającej walcowanie z równoczesnym osiowym, oscylacyjnym ruchem walców. Przeprowadzone próby walcowania pozwoliły na określenie parametrów zapewniających uzyskanie wyrobów o wymaganych cechach geometrycznych oraz ustalenie wpływu tych parametrów na siłę, pracę odkształcania i strukturę materiału. Badania przeprowadzono również dla procesu segmentowego kształtowania. Proces ten pozwala na wytwarzanie elementów o małej grubości w stosunku do wymiaru poprzecznego odkuwki oraz wykonywanie, dowolnie rozmieszczonych, lokalnych wgłębień. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla elementu o zarysie kołowym z promieniowo rozmieszczonymi wgłębieniami (żebami). Analiza przebiegu płynięcia materiału w trakcie wgłębiania segmentów stempla wykazała możliwość uzyskiwania wgłębienia o dużej powierzchni w wyniku sumowania wgłębień pojedynczych segmentów o bardzo małej powierzchni. Obydwa sposoby odkształcania, walcowanie z równoczesnym osiowym ruchem walców i kształtowanie segmentowe, znacznie rozszerzają możliwości procesów objętościowej obróbki plastycznej w zakresie oddziaływania na strukturę właściwości materiałów oraz możliwych do uzyskania cech geometrycznych wyrobów. Pełne rozpoznanie możliwości jakie dają te procesy wymaga przeprowadzenie dalszych badań.

### **Abstract**

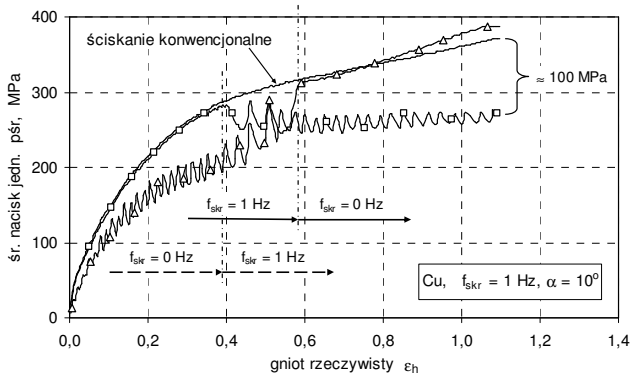
*The demand for materials with better operation properties and for new or improved technologies of manufacturing them are a motivation for searching new materials and new technologies of obtaining them. The investigation included the analysis if the influence of the deformation path on the force and energetic parameters as well as on the material structure in the processes of compression with simultaneous or sequential twisting. The results obtained were a basis for the design and execution of a rolling mill able to perform rolling with simultaneous axial oscillating motion of the rolls. The rolling tests performed have allowed for the determination of the parameters ensuring products with the required geometrical features and determination of the influence of those parameters on the force, deformation work and material structure. Investigation of incremental forming has also been performed. The process makes it possible to manufacture elements with small thickness in relation to the transverse dimension of the forging, as well as to make local recesses situated at any place. Experiments were performed for an element with circular outline with radially oriented recesses (ribs). The analysis of material flow during the punch penetration has shown the possibility of obtaining a recess with large area as a result of summing single recesses of very small areas. Both ways of deformation, i.e. rolling with simultaneous axial motion of the rolls and incremental forming, significantly extend the possibilities of the volumetric metal forming in the scope of influencing the material structure and properties, as well as the obtainable geometrical features of the products. A full recognition of the possibilities offered by those processes requires further investigation.*

**Słowa kluczowe:** odkształcenie plastyczne, droga odkształcenia, odkształcanie segmentowe, struktura materiału

**Key words:** deformation, deformation path, incremental forming, material structure

## 1. WPROWADZENIE

Zapotrzebowanie na materiały o lepszych właściwościach użytkowych i nowe bądź ulepszone, ze względów ekonomicznych i ekologicznych, technologie ich wytwarzania, inspirowały do poszukiwań nowych materiałów i nowych technologii ich otrzymywania. Ta tendencja dominuje w badaniach naukowych. Niezależnie zatem od poszukiwania nowych, zaawansowanych materiałów, należy postawić pytanie: *czy potencjalne możliwości, kryjące się w naturze metalu i procesach strukturalnych, zostały wystarczająco dobrze poznane i czy nie ma jeszcze innych, oprócz powszechnie stosowanych, sposobów wytwarzania i przetwarzania pozwalających polepszyć właściwości znanych i stosowanych materiałów?* Pytanie to staje się szczególnie aktualne w odniesieniu do materiałów metalicznych, kształtowanych w operacjach przeróbki plastycznej, w których reakcja na różne sposoby obciążania jest często zaskakująca i nie znajduje pełnego wyjaśnienia w oparciu o aktualny stan wiedzy (rys.1).



Rys. 1. Wpływ drogi odkształcenia na wartość średnich nacisków jednostkowych w próbie ściskania z równoczesnym lub sekwencyjnym oscylacyjnym skręcaniem próbek walcowych

*Fig. 1. Influence of deformation path on medium pressure in compression test with simultaneous or sequential twisting*

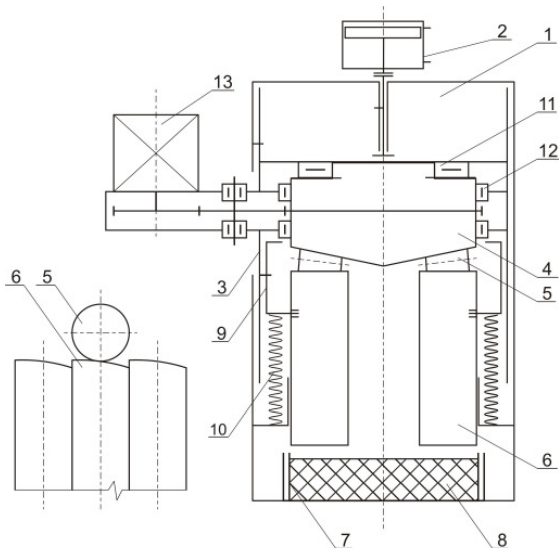
Wyniki wieloletnich badań [1-7] dowodzą, że możliwe jest znaczące obniżenie siły kształtowania plastycznego metalu, poprzez sterowaną ewolucję struktury w trakcie plastycznego odkształcania. Kontrolowany rozwój struktury staje się przy tym sposobem osiągnięciażądanego zespołu własności użytkowych wyrobu.

Możliwości sterowania finalną strukturą zostały osiągnięte przez formowanie pseudo-periodycznej substruktury dyslokacyjnej i jej wykorzystanie do wytworzenia struktury typu kompozyt w powszechnie stosowanych stopach metali. Osiągnięte efekty stanowią również bardzo zachęcającą prognozę w zakresie możliwości wytwarzania wyrobów o bardzo dużym odkształceniu, na zimno lub w podwyższonych temperaturach, bez konieczności stosowania wielokrotnych zabiegów międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

## 2. KSZTAŁTOWANIE SEGMENTOWE

Proces kształtowania segmentowego polega na wykonywaniu wgłębień o dużej powierzchni i głębokości poprzez sumowanie wgłębień pojedynczych segmentów o małej powierzchni nacisku oraz małym pojedynczym wgłębieniu. Do realizacji takiego sposobu odkształcania skonstruowano specjalny przyrząd [8,9]. Specyfiką przyrządu jest konstrukcja stempla górnego, który składa się z szeregu skojarzonych ze sobą segmentów (rys. 2). Ruch roboczy segmentów stempla, wywołujący odkształcanie materiału, odbywa się poprzez oddziaływanie rolek osadzonych w gniazdach na górną oporową część segmentów. W zależności od liczby rolek odkształcanie może być realizowane jednocześnie przez taką samą liczbę segmentów.

Przykładowo, zastosowanie trzech rolek wywołuje jednoczesny ruch roboczy trzech segmentów. Pozostałe segmenty nie uczestniczą w danej chwili w odkształceniu. Liczba segmentów stempla jest wielokrotnością liczby rolek, przykładowo: dla układu 3 rolek przewiduje się 6, 9, 12 segmentów. Segmentowa konstrukcja stempla oraz kinematyka ruchu narzędzia wywołuje lokalne, strefowe uplastycznienie materiału. Strefy uplastycznione pojawiają się w materiale sekwencyjnie w liczbie równej liczbie zastosowanych rolek i z częstotliwością, która zależy od prędkości obrotowej osady, w której osadzone są rolki. Taki sposób realizacji odkształcania zapewnia istotne obniżenie niezbędnej do kształtowania siły.

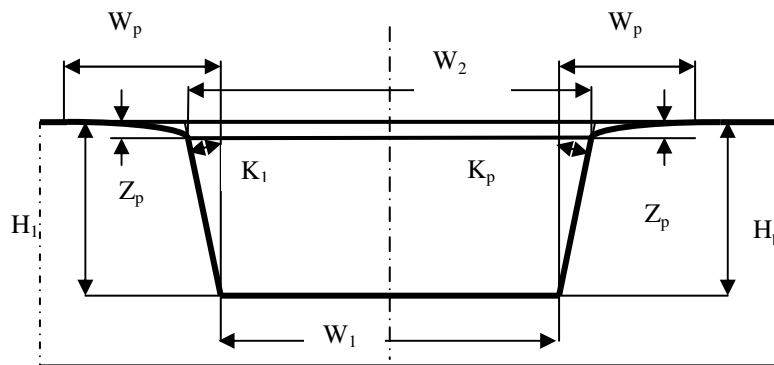


Rys. 2. Schemat przyrządu do segmentowego kształtowania odkuwek: 1 - korpus, 2 - cylinder hydrauliczny prasy, 3 - suwak, 4 - talerz dociskowy, 5 - element toczy dociskowy (rolka), 6 - stempel segmentowy, 7 - matryca, 8 - materiał odkształcany, 9 - pierścień prowadzący, 10 - sprężyna powrotna, 11 - łożysko oporowe, 12 - łożysko poprzeczne, 13 - napęd

Fig. 2. Schematic representation of a device for incremental forging: 1 - body, 2 - hydraulic cylinder of a press, 3 - slider, 4 - pressure plate, 5 - pressure roller, 6 - incremental punch, 7 - die, 8 - workpiece, 9 - guide ring, 10 - return spring, 11 - thrust bearing, 12 - radial bearing, 13 - drive

Całkowity nacisk prasy jest przekazywany na części powierzchni odkształcanego materiału, tym samym uzyskujemy lokalnie duże wartości nacisków jednostkowych i możliwość uplastycznienia materiałów charakteryzujących się znacznym oporem plastycznym. Pozwala tym samym kształtować w sposób efektywny odkuwki pierścieniowe, w postaci krążków, kół uźbrowanych charakteryzujących się dużą powierzchnią czołową oraz niekorzystnym z punktu widzenia nacisków kształtowania małym stosunkiem wysokości odkuwki do średnicy zewnętrznej. Występujące w tradycyjnych sposobach kształtowania, tego typu odkuwek, duże naciski powodują przeciążenie urządzeń oraz zjawiska niszczenia narzędzi roboczych stempli i matryc.

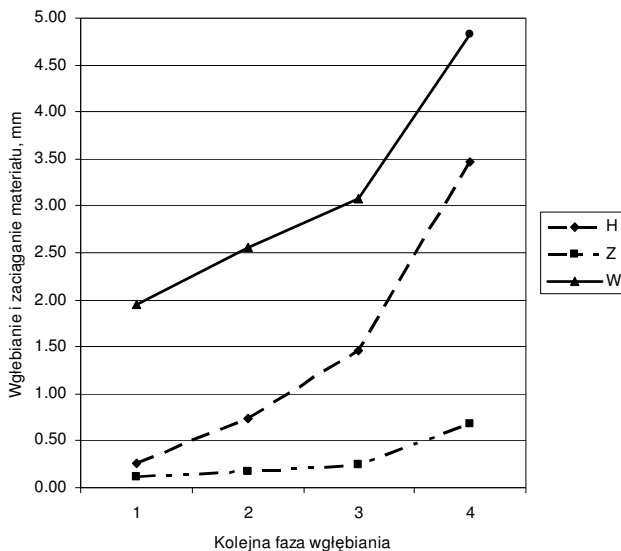
Krytycznym elementem, w opanowaniu tego sposobu odkształcania, jest płynięcie materiału w obszarze powierzchni styku kolejnych segmentów narzędzia wgłębiającego się w odkształcany materiał. Wykonane próby kształtowania [10] wykazały, że wgłębianiu towarzyszy efekt zaciągania materiału. Wgłębienie na głębokość  $H_p$  powoduje efekt poszerzenia (z wymiaru  $W_1$  na  $W_2$ ) z charakterystycznymi elementami w postaci łukowego przejścia o wymiarze poziomym  $W_p$  i zaciągnięciu o głębokości  $Z_p$  oraz pochyleniu ścianek  $K$  (rys. 3).



Rys. 3. Cechy geometryczne wgłębienia segmentu

Fig. 3. Geometrical feature of penetration depth

Taki charakter płynięcia materiału pozwala na bezpieczne wglębianie segmentu, bez obawy o dostawanie się materiału w szczelinę pomiędzy przylegające segmenty. Parametry opisujące ilościowo wpływ cech geometrycznych segmentów i wielkości wglębiania na cechy geometryczne wglębiania przedstawia rys. 4.

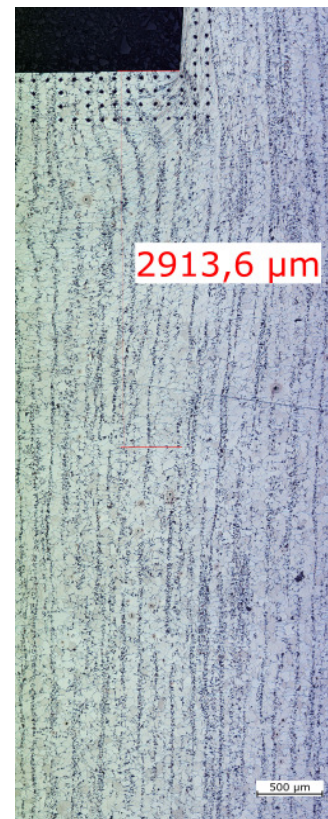


Rys. 4. Wpływ wielkości wglębiania na wielkość zaciągania

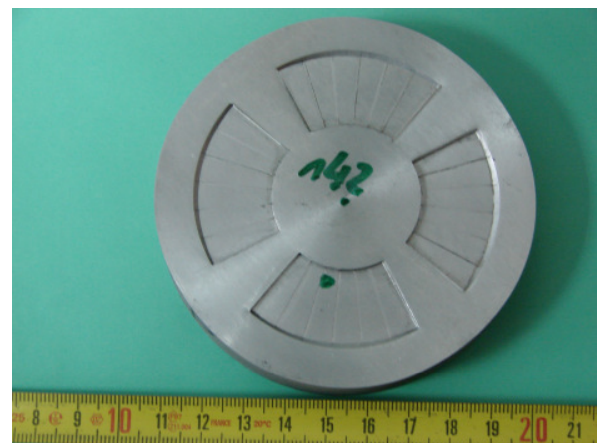
Fig. 4. Influence of penetration depth on value of drag

Interesujące są obserwacje zasięgu strefy odkształcenia spowodowanego wglębianiem segmentów. Przeprowadzone w INOP w Poznaniu obserwacje makrostruktury i pomiary twardości wykazują, że zasięg strefy odkształcenia jest bardzo rozległy (rys. 5).

Pierwsze próby wykonania elementu konstrukcyjnego z promieniowo rozmieszczonymi wglębieniami (żebami), zostały przeprowadzone na przyrządzie umieszczonym w przestrzeni roboczej prasy z wahającą matrycą PXW-200. Materiałem wsadowym był krążek ze stopu aluminium o średnicy  $d = 60$  mm. Odkuty wyrób pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Makrostruktura strefy odkształcenia  
Fig. 5. Macrostructure of deformed area

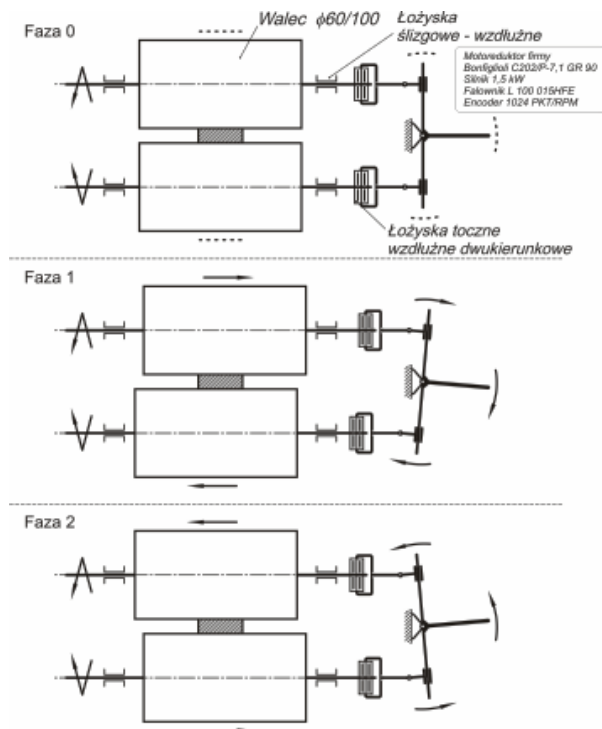


Rys. 6. Odkuwka doświadczalna  
Fig. 6. Tested forging

### 3. WALCOWANIE Z POOSIOWYM RUCHEM WALCÓW

W procesie walcowania ze zmianą drogi odkształcenia (WZDO), efekt zmiany drogi odkształcenia jest wywołany przez wprowadzenie dodatkowego, cyklicznego ruchu poosiowego walców roboczych. W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych tego procesu konieczne było zbudowanie specjalnej

walcarki laboratoryjnej, umożliwiającej taki ruch narzędzi. Walcarka laboratoryjna ma dwa walce robocze o średnicy 60 mm. Walce robocze w trakcie walcowania mogą przemieszczać się poosiowo w przeciwnych kierunkach. W celu przeniesienia ruchu poprzecznego walców na odkształcany materiał na beczce walców znajdują się obwodowe rowki. Maksymalna wielkość wychylenia poosiowego walców wynosi  $\pm 2$  mm, co pozwala na uzyskanie amplitudy przemieszczenia równej 8 mm. Częstotliwość ruchu poosiowego walców może być regulowana w zakresie od 0 do 3 Hz, podobnie jak prędkość obrotowa walców regulowana w zakresie od 0 do 20 obr./min [12]. Schemat kinematyczny mechanizmu pozwalającego na cykliczny, poosiowy ruch walców w trakcie walcowania przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat kinematyczny walcarki z cyklicznym, poosiowym ruchem walców [4]

Fig. 7. Kinematic scheme of rolling mill with cyclic, transverse rolls movement [4]

Badania procesu walcowania z cyklicznym poosiowym ruchem walców prowadzone są od wielu lat. Obejmowały one m.in. wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów prowadzenia procesu walcowania WZDO z punktu widzenia kształtu odwalcowanego pasma [13], badania efektu cieplnego powstającego w trakcie

walcowania [14] oraz próby uzyskania materiałów o strukturze nanometrycznej [15]. W ostatnim czasie główny nacisk w badaniach został położony na określenie pracy odkształcenia niezbędnej do prowadzenia procesu walcowania z cyklicznym, poosiowym ruchem walców. Analizie poddano również efekty strukturalne wywołane zmianą drogi odkształcenia.

Materiałem do badań była miedź elektrolityczna M1E. Wymiary początkowe pasm wynosiły 8x8x100 mm (b x h x l) i były podyktowane możliwościami napędu walcarki. Parametry prowadzenia procesu walcowania zostały dobrane na podstawie wcześniejszych badań i zostały przedstawione w tablicy 1.

Tablica 1. Parametry procesu walcowania ze zmianą drogi odkształcenia zastosowane w badaniach

Table 1. Parameters of rolling process with cyclic change of the strain path used in presented research

wielkość gniotu $\epsilon_h$ , [%]	prędkość walcowania $v_w$ , [m/s]	częstotliwość ruchu poosiowego walców $f$ , [Hz]	amplituda ruchu poosiowego walców $A$ , [mm]
5	0,022	1	1,4
10	0,044	2	2,8
20	0,063	3	4,0

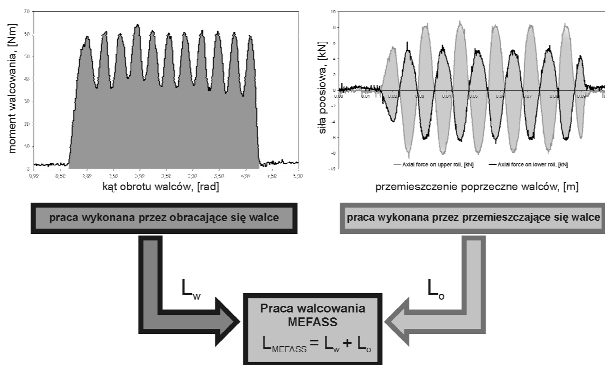
Zależnie od przyjętego wariantu prowadzenia procesu przeprowadzono od 3 do 9 przepustów walcowania. Program badań obejmował również przeprowadzenie przepustów walcowania konwencjonalnego, w celu określenia poziomu odniesienia, dla efektów uzyskiwanych w procesach z cyklicznie zmienną drogą odkształcenia.

Wyznaczenie pracy odkształcenia było jednym z najważniejszych celów prowadzonych badań. Do tej pory w literaturze procesy odkształcenia ze zmianą drogi odkształcenia były określane jako energooszczędne, w związku z możliwością obniżenia siły nacisku w procesie. Nie brano jednak w tych rozważaniach pod uwagę energii potrzebnej do wykonania dodatkowego, poosiowego ruchu narzędzi kształtujących.

Praca odkształcenia w procesie walcowania konwencjonalnego jest wyznaczana jako



iloczyn momentu walcowania oraz kąta obrotu walców roboczych. W procesie walcowania WZDO konieczne jest uwzględnienie pracy wykonywanej nie tylko przez ruch obrotowy walca ale również przez cykliczny ruch poosiowy. Praca związana z ruchem poprzecznym walców była wyznaczona z iloczynu siły osiowej oraz wielkości przemieszczenia walca. Metodę wyznaczania pracy odkształcenia w procesie walcowania WZDO przedstawiono na rysunku 8.

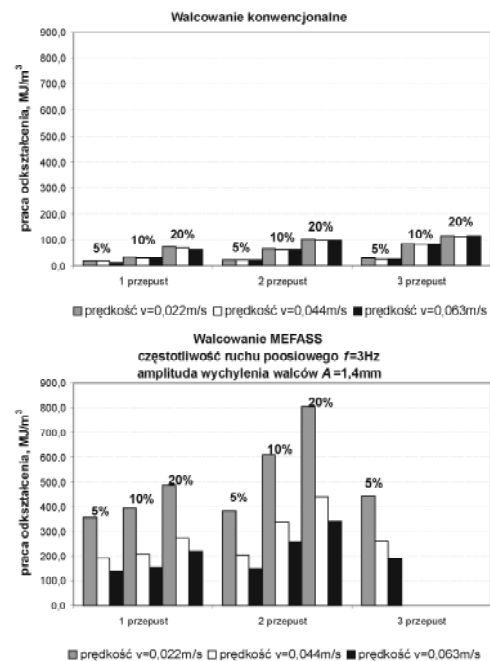


Rys. 8. Schemat wyznaczania pracy w procesie walcowania z cykliczną zmianą schematu obciążenia - WZDO

Fig. 8. Diagram of deformation work evaluation in WZDO rolling process

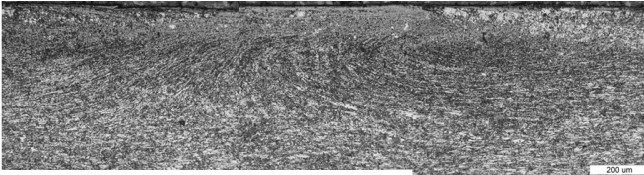
Porównanie wielkości pracy odkształcenia w procesie walcowania konwencjonalnego z procesem WZDO wykazało, że prowadzenie procesu WZDO wymaga zdecydowanie większej energii – rys 9. Szczególnie w przypadku prowadzenia procesu z niewielkimi prędkościami walcowania, wymaganymi ze względu na wspomniane wcześniej korzystne warunki odkształcenia w kotlinie walcowniczej, wielkość energii konieczna do prowadzenia procesu walcowania przewyższa kilkukrotnie energię niezbędną do prowadzenia procesu walcowania konwencjonalnego. Jest to wynik dużej liczby poosiowych przemieszczeń walców przypadających na jednostkę objętości pasma. Obniżenie prędkości walcowania powoduje zwiększanie liczby cykli ruchu poosiowego walców. Jak wynika z badań, przedstawionych w pracach [16], zastosowanie niewielkich prędkości walcowania pozwala na uzyskanie najlepszych rezultatów z punktu widzenia kształtu pasma oraz jednorodności odkształcenia w objętości materiału. Wynika z tego, że

prowadzenie procesu WZDO z najkorzystniejszymi parametrami wymaga dostarczenia największej ilości energii, niezbędnej do odkształcenia materiału. Obserwacje zgięć metalograficznych wykonanych na przekrojach poprzecznych walcowanych pasm wykazały efekty lokalizacji odkształcenia wywołanego przez zmianę drogi odkształcenia w trakcie walcowania. Efekt lokalizacji odkształcenia można zaobserwować już po drugim przepuście walcowania, co wynika z nałożenia się na siebie efektów zmiany drogi odkształcenia z poprzedniego przepustu. Wraz ze wzrostem liczby przepustów następuje intensyfikacja efektu lokalizacji odkształcenia – rys. 10. Rysunek przedstawia mikrostrukturę walcowanego pasma z maksymalnymi parametrami ruchu poosiowego walców tj. amplitudą przemieszczenia walców  $A = 4,0$  mm oraz częstotliwością ruchu poosiowego  $f = 3$  Hz. Na przekroju poprzecznym pasma, szczególnie w warstwach przypowierzchniowych, zaobserwowano zjawisko niejednorodności odkształcenia. Jednak w kolejnych przepustach jest ono likwidowane przez procesy zdrowienia i rekrytalizacji, wywołane efektem cieplnym wywołanym w trakcie odkształcenia ze zmianą drogi odkształcenia [15].



Rys. 9. Porównanie wykonanej pracy w procesie walcowania konwencjonalnego (a) oraz walcowania z cyklicznym, poosiowym ruchem walców (b)

Fig. 9. Deformation work comparison between conventional rolling process (a) and WZDO rolling process (b)



Rys. 10. Mikrostruktura miedzi obserwowana na przekroju poprzecznym pasma po 9 przebiegach walcowania z cykliczną zmianą drogi odkształcenia

*Fig. 10. Copper microstructure observed on cross section of strip after 9 pass of rolling with cyclic change of the strain path*

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w opracowaniu nowe, niekonwencjonalne procesy przeróbki plastycznej otwierają nowe perspektywy wykorzystania odkształcania z wymuszoną drogą odkształcania w procesach przemysłowych. Konieczne jest kontynuowanie badań które pozwolą na uzyskanie pełnej informacji o ewolucji struktury metalu w specyficznych warunkach odkształcenia i jej wpływie na plastyczne płynięcie metalu w aspekcie właściwości technologicznych i użytkowych.

Zasadniczymi zaletami nowych sposobów kształtowania są:

- możliwość uzyskiwania dużych odkształceń plastycznych na zimno, bez konieczności międzyoperacyjnej obróbki cieplnej,
- możliwość znaczącego obniżenia sił nacisku narzędzi kształtujących,
- zmniejszenie nakładu energii niezbędnej dla uzyskania wymaganej wielkości odkształcenia zastępczego,
- możliwość uzyskania ultra drobnoziarnistej (w tym prawdopodobnie nanometrycznej) struktury materiału,
- uzyskanie nietypowego zespołu właściwości użytkowych wyrobów gotowych.

Przedstawione w artykule sposoby przeróbki plastycznej są oryginalnymi, polskimi osiągnięciami w zakresie rozwiązań techniczno-technologicznych i są chronione zgłoszeniami patentowymi [8-12]. Aktualny stan rozpoznania możliwości praktycznego zastosowania jest w fazie wstępnych badań. Niezbędne jest prowadzenie prac badawczych, które pozwolą na określenie rezerw w zakresie możliwości kształtowania, w tych procesach, struktury i właściwości użytkowych wyrobów.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt rozwojowy R 0702601.*

#### LITERATURA

- [1] W. Bochniak. A., Korbel: Extrusion of CuZn39Pb2 alloy by the KOBO method, Engineering Transactions, Vol.47, 1999, pp. 351-367.
- [2] J. Pawlicki., F. Grosman: Influence of Deformation Process on a Strain Stress of Polycrystalline Materials, Iron Ores and Non-Ferrous Metals, No.11, 1999, pp. 565-568.
- [3] F. Grosman: Trends in Development of Plastic Working of Metals, Plastic Working of Metals, No.3, 2000, pp. 7-12.
- [4] A. Wrożyna., K. Rodak., G. Niewielski, F. Grosman, J. Pawlicki: Wpływ ściskania z oscylacyjnym skręcaniem na zmianę średnich nacisków jednostkowych i mikrostrukturę miedzi. Wydawca: SIGMA NOT Inżynieria Materiałowa, 3, 2006, s. 308-311.
- [5] G. Niewielski, D. Kuc, K. Rodak, F. Grosman, J. Pawlicki: Influence of strain on the copper structure under controlled deformation path conditions, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 17, Issue 1-2, 2006, pp. 109-112.
- [6] F. Grosman, J. Pawlicki: Concepts of technological applications in controlled deformation of materials. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, Advanced Technology of Plasticity, Yokohama, Japan, vol.1, 2002, pp. 1219-1224.
- [7] F. Grosman, J. Pawlicki: Processes with forced deformation path, Proceedings of the 1<sup>th</sup> International Conference on New Forming Technology, Harbin, China, 2004, pp. 361-366.
- [8] Zgł. pat. pol. P-379859, Sposób kształtowania odkuwek i przyrząd do kształtowania odkuwek matrycą segmentową.
- [9] Zgł. pat. pol. P-379861, Przyrząd do obróbki plastycznej matrycą segmentową.
- [10] Sprawozdanie okresowe z realizacji projektu rozwojowego R0702601, Katedra Modelowania Procesów i Inżynierii Medycznej Politechniki Śląskiej, Katowice, marzec 2008 r., (niepublikowane)
- [11] Zgł. pat. pol. P-361148, Sposób walcowania, zwłaszcza metali oraz klatka walcownicza do walcowania, zwłaszcza metali.
- [12] Cyganek Z., Grosman F., Pawlicki J.; Walcowanie z cykliczną zmianą schematu obciążenia, III Konferencja Naukowa „Walcownictwo 2005”, Ustroń, 19-21.10.2005, s. 255 – 259.

- [13] Cyganek Z., Grosman F. : Wpływ parametrów walcowania z cykliczną zmianą schematu obciążenia na kształt pasm walcowanych oraz wielkość uzyskanego odkształcenia, XIV Seminarium Naukowe "Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej", Katowice, 19 maja, 2006, s. 45-50.
- [14] Cyganek Z. , Grosman F.: Influence of MEFASS rolling parameters on temperature of formed strip, Acta Metallurgica Slovaca, 2007, volume 13, nr 2, s. 156 – 162.
- [15] Sus-Ryszkowska M., Grosman F., Pawlicki J., Kuziak R., Drużycka-Wienczek A., Kurzydłowski K.J.: Properties and microstructure of 316LVM steel subjected to severe plastic deformation by Max Strain and transverse rolling, NATO ARW, Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation, Donetsk, Ukraine; 22-26.10.2004.
- [16] Cyganek Z.: Analiza procesu walcowania metodą MEFASS w zakresie odkształceń sprężysto – plastycznych. Sprawozdanie z pracy BW-505/RM-2/2007 (nie publikowane).