

Prof. dr hab. inż. Franciszek GROSMAN
Politechnika Śląska, Katowice

Procesy kształtowania plastycznego wspomagane naprężeniami ścinającymi

Metal forming processes aided by shear stresses

Streszczenie

W pracy zaprezentowano oryginalne koncepcje prototypowych stanowisk do spęczania z jednoczesnym oscylacyjnym skręcaniem, spęczania z równoczesnym, równomiernym w całej objętości, odkształcaniem postaciowym oraz walcowania z wymuszonym ruchem osiowym walców. Realizowane w ten sposób odkształcanie materiałów metalicznych pozwala na wykorzystanie efektu „pasm ścinania” i ciepła generowanego w wyniku odkształcenia plastycznego. Wyniki realizowanych prac stanowią podstawę do opracowania praktycznych zaleceń techniczno-technologicznych do projektowania nowych sposobów przetwórstwa metali i konstruowania urządzeń do obróbki plastycznej.

Abstract

The paper presents original concepts of a prototype stands for simultaneous compression and oscillatory torsion, simultaneous compression and shear deformation, uniform in the whole workpiece volume, as well as for rolling with forced axial movement of rolls. Deformation of metallic materials in this way allows for utilization of the “shear bands” effect and the heat generated by plastic deformation. The results of conducted research are the basis for development of technical and technological recommendations for designing new techniques of metal forming and constructing the metal forming equipment.

Słowa kluczowe: odkształcenie plastyczne, naprężenie ścinające, droga odkształcenia, niekonwencjonalne kucie, niekonwencjonalne walcowanie

Key words: plastic deformation, shear stress, deformation path, unconventional forging, unconventional rolling

1. WSTĘP

Badania naukowe w metalurgii i inżynierii materiałowej skupione są na poszukiwaniu materiałów o coraz lepszych właściwościach użytkowych i nowych bądź ulepszonych, ze względów ekonomicznych i ekologicznych, technologiach ich wytwarzania. Dotychczas wykorzystywane możliwości oddziaływania na zwiększenie plastyczności metali i stopów oraz nadawane w procesach obróbki plastycznej właściwości wyrobów, poprzez dobór takich warunków obróbki plastycznej jak: wskaźnik stanu naprężenia ($k_\sigma = \sigma_m/\sigma_p$), temperatura (T), prędkość odkształcenia ($\dot{\epsilon}$), wielkość odkształceń jednostkowych (ϵ_{poj}) zostały praktycznie wyczerpane i nie stwarzają możliwości uzyskania dalszych znaczących efektów.

1. INTRODUCTION

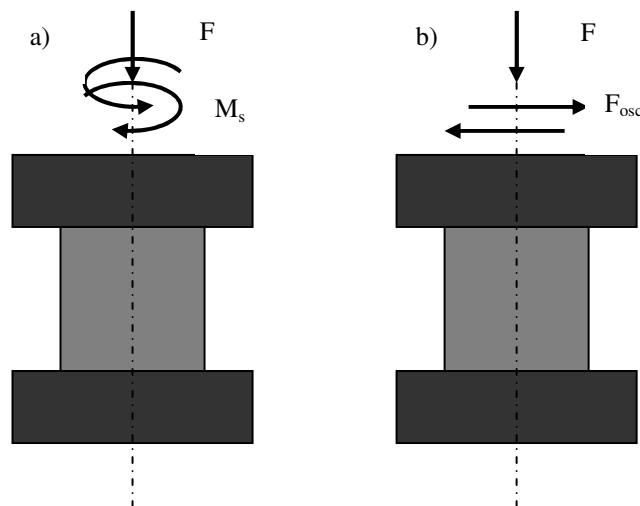
Scientific research in metallurgy and materials engineering is concentrated on the search for materials with better functional properties and new or improved, based on economic and ecological criteria, technologies for their production. The capabilities utilized up to this point for increasing the plasticity of metals and alloys and endowing product properties during plastic working, through the selection of such conditions of plastic working as: stress state index ($k_\sigma = \sigma_m/\sigma_p$), temperature (T), strain rate ($\dot{\epsilon}$), unit strain value (ϵ_{poj}), have been practically exhausted, and there is no method to obtain further significant effects.

Nowe możliwości, w zakresie zwiększenia efektywności oddziaływania procesu obróbki plastycznej na strukturę i właściwości materiałów, otwiera wprowadzenie w konwencjonalnych procesach dodatkowego oddziaływania naprężeń ścinających oraz efektu kumulowania odkształceń, spowodowanych cykliczną powtarzalnością oddziaływania tych naprężeń. Najprostszym przykładem realizacji takiego sposobu odkształcania jest ściskanie połączone z cyklicznym skręcaniem (rys. 1a) lub ściskanie połączone z cyklicznym odkształceniem poprzecznym, spowodowanym działaniem cyklicznie zmiennej siły prostopadłej do kierunku działania siły ściskającej (rys. 1b).

Prowadzone w tym zakresie analizy i badania eksperymentalne zaowocowały nowym spojrzeniem na procesy plastycznego kształtowania metali. W oparciu o wyniki prowadzonych badań opracowano oryginalne konstrukcje urządzeń wywołujących efekt zmiany schematu stanu naprężenia, w całej objętości odkształcanego materiału, w stosunku do konwencjonalnych, powszechnie stosowanych technologii.

New capabilities which increase the effectiveness of the influence of plastic working on material structure and properties open the door to the introduction of additional influence of shear stresses and the strain accumulation effect, caused by the cyclic repetition of the influence of these stresses, to conventional processes. The simplest example of the realization of such a method of deformation is compression combined with cyclic torsion (fig. 1a) or compression combined with cyclic transverse strain, caused by the action of a cyclically variable force perpendicular to the direction of the action of the compressive force (fig. 1b).

Analysis and experimental studies carried out on this subject gave fruit to a fresh view on plastic metal forming processes. Based on the results of conducted studies, original machine constructions, producing the effect of a change in stress state in the entire volume of the deformed material, were designed, as opposed to conventional, generally used technology.



Rys. 1. Ściskanie połączone z równoczesnym cyklicznym skręcaniem (a) i z równoczesnym odkształceniem poprzecznym (b)

Fig. 1. Simultaneous compression and cyclic torsion (a) and simultaneous compression and transverse shear deformation (b)

Podstawowymi efektami zastosowania nowych technologii są:

- poprawa warunków zamykania i zgrzewania wewnętrznych nieciągłości w materiałach odlewanych,
- możliwość efektywnej konsolidacji materiałów porowatych,
- zwiększenie osiąganych w procesie obróbki plastycznej wielkości odkształceń lokalnych,
- zwiększenie jednorodności odkształcenia plastycznego w całej objętości kształtowanego materiału,
- nadawanie nieosiągalnych, w konwencjonalnych procesach przeróbki plastycznej, właściwości użytkowych gotowym wyrobom.

Dodatkowym praktycznym efektem, tak prowadzonych procesów, to możliwość uzyskiwania dużych odkształceń plastycznych na zimno bez konieczności międzyoperacyjnej obróbki cieplnej.

Aktualnie prowadzone prace badawcze zmierzają do ustalenia warunków sterowanej ingerencji w przebieg plastycznego płynięcia w procesach kucia i walcowania. Efekty tak prowadzonych procesów kucia i walcowania to: redukcja liczby przepustów, obniżenie parametrów siłowych odkształcenia oraz wygenerowanie żądanej struktury metalu.

2. TECHNOLOGICZNA PLASTYCZNOŚĆ MATERIAŁÓW W PROCESACH KSZTAŁTOWANIA PLASTYCZNEGO WSPOMAGANYCH DODATKOWYMI NAPRĘŻENIAMI ŚCINAJĄCYMI

Podstawą prawidłowej symulacji i projektowania procesów technologicznych jest znajomość charakterystyk opisujących właściwości technologiczne materiału. Dla każdego procesu technologicznego można określić zestaw cech, które dobrze opisują podatność materiału do danego procesu. Dla procesów przeróbki plastycznej podstawowymi cechami charakteryzującymi podatność materiału do kształtowania plastycznego są: naprężenie uplastyczniające σ_p i odkształcenie graniczne ε_g .

The basic effects of this new technology are:

- *improvement of conditions for closing and welding internal discontinuities in cast materials,*
- *a capability of effective consolidation of porous materials,*
- *an increase in local strain values during the plastic forming process,*
- *an increase in the uniformity of plastic strain in the entire volume of the formed material,*
- *endowment of functional properties that are impossible to achieve in conventional plastic forming processes.*

An additional practical effect of processes carried out as such, is the possibility of obtaining large plastic strain during cold working without the necessity of heat treatment between operations.

The research work currently being carried out aims to establish the conditions of controlled interference in the course of plastic flow in rolling and forging processes. The effects of rolling and forging processes carried out under these conditions are: reduction of the amount of roll passes, a decrease in strain force parameters, as well as the generation of the desired metal structure.

2. TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF MATERIALS IN METAL FORMING PROCESSES AIDED BY ADDITIONAL SHEAR STRESSES

The basis of correct simulation and design of technological processes is knowledge of the characteristic curves describing the technological properties of the material. A set of characteristics which aptly describe the susceptibility of the material to a process, can be established for any given technological process. For metal forming processes, the basic qualities characterizing the susceptibility of the material to plastic working is: flow stress σ_p and limit strain ε_g .

W oparciu o aktualny stan wiedzy można stwierdzić, że dla procesów przeróbki plastycznej na zimno naprężenie uplastyczniające jest funkcją wielkości odkształcenia ε i historii przebiegu odkształcenia h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, h_\varepsilon)$$

Potwierdzeniem konieczności prowadzenia badań w zakresie wpływu historii odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego są wyniki prac wykonanych przez A. Korbel [1], R.B. Pęcherskiego [2], M. Pietrzyka [3] i prace własne [4, 5, 6, 7]. Wyniki tych prac potwierdzają wpływ drogi odkształcenia na poziom naprężenia uplastyczniającego, jednak zawierają konkretne rozwiązania tylko dla jednostkowych, wybranych przebiegów drogi odkształcenia. Brak jest natomiast prac nad opracowaniem funkcji, która opisywałaby wpływ dowolnej drogi odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego. Dla procesów przeróbki plastycznej, w których lokalne przebiegi stanów odkształcenia istotnie różnią się od przebiegów proporcjonalnych i monotonicznych, poprawne wyniki symulacji komputerowej można otrzymać tylko w przypadku zastosowania funkcji uwzględniającej wpływ historii odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego.

W kraju pierwszą próbę opracowania funkcji naprężenia uplastyczniającego uwzględniającej wpływ wymuszonej drogi odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego podjął R.B. Pęcherski [2]. Funkcję tę opracował dla procesu nieswobodnego ściskania próbek z polikrystalicznej miedzi w płaskim stanie odkształcenia, który znany jest z literatury jako test doświadczalny określany nazwą „próba kanalikowa”. Dla przyrostowego prawa płynięcia wprowadził fenomenologiczną funkcję udziału mikropasm ścinania $f_{MS}(\varepsilon)$, którą wyznaczył rozwiązując zagadnienie identyfikacji modelu. Takie rozwiązanie nie ma niestety cechy uniwersalności i wymaga opracowania, dla każdego przebiegu odkształcenia, indywidualnej funkcji $f_{MS}(\varepsilon)$, która praktycznie pełni rolę „współczynnika korekcyjnego” i nie ma pełnego uzasadnienia fizycznego.

Based on the current state of knowledge, it can be stated that for cold working processes, flow stress is a function of strain value ε and strain history h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, h_\varepsilon)$$

The results of studies carried out by A. Korbel [1], R.B. Pecherski [2], M. Pietrzyk [3], and my own studies [4,5,6,7] confirm the necessity of conducting research regarding the influence of strain history on the value of flow stress. The results of these studies confirm the influence of the path of deformation on the level of flow stress; however they only contain concrete solutions for individual, selected courses of the deformation path. There is a lack of studies related to the development of a function that would describe the influence of any deformation path on the value of flow stress. For metal working processes in which local courses of strain states significantly differ from monotonous and proportional courses, correct results from a computer simulation can be obtained only when a function taking the influence of strain history on the value of flow stress into account is used.

The first attempt to elaborate a function of flow stress by taking into account the influence of a forced deformation path on the value of flow stress in the country was undertaken by R.B. Pecherski [2]. He developed this function for the process of bounded compression of polycrystalline copper samples in a flat strain state, which is known in the literature as an experimental test referred to as "the channel test." For the incremental law of flow, he introduced a phenomenological function of the contribution of shear microbands $f_{SM}(\varepsilon)$, which he determined by solving the problem of model identification. Unfortunately, such a solution is not universal and requires the elaboration of an individual function $f_{SM}(\varepsilon)$, for every strain course, which practically plays the role of a "correctional coefficient" and does not have full physical substantiation.

O potrzebie znalezienia funkcji opisującej wpływ drogi odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego świadczą wyniki badań F. Grosmana i J. Pawlickiego [6, 7]. Przebieg wielkości naprężenia uplastyczniającego uzyskany w próbach sekwencyjnego skręcania i rozciągania oraz skręcania ze zmianą znaku momentu skręcającego wskazuje na istotny wpływ historii odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego.

Prowadzone od wielu lat badania eksperymentalne, wskazują na wysoką czułość materiału na zachodzące w trakcie kształtowania zmiany kierunku działania składowych zewnętrznych obciążenia. Celem badań eksperymentalnych i prac teoretycznych jest określenie charakterystyk naprężenia uplastyczniającego materiałów metalicznych oraz opracowanie metody identyfikacji modelu płynięcia plastycznego w kontrolowanych warunkach obciążenia [7, 8, 9]. Próby kształtowania prowadzone są na maszynie wytrzymałościowej do badań materiałów w złożonych warunkach obciążeń. Maszyna posiada możliwość sterowania zarówno manualnego jak i komputerowego. System umożliwia sterowanie przebiegiem prób, poprzez zadawanie konkretnej wartości parametrów uogólnionego przemieszczenia: drogi Δl [mm] i kąta skręcania α [stopnie] oraz prędkości ruchu tawersy v_t [mm/min]. Zadane parametry sterujące uruchamiają wybrane mechanizmy napędu urządzenia w określonej kolejności. Oprogramowanie umożliwia również jednoczesne zadawanie wielkości obciążenia (siła osiowa, moment skręcający, ciśnienie wewnętrzne dla próbek rurowych). W trakcie prób możliwa jest wizualizacja wyników pomiarów poprzez bieżące śledzenie przebiegu charakterystyk siłowych w funkcji czasu lub przemieszczenia. Wskazania parametrów pomiarowych wyświetlane są w postaci liczb oraz wykresów. Oprogramowanie posiada również moduł prezentacji wyników w postaci graficznej oraz możliwość wydruku.

Zakres możliwych wariantów odkształcenia obejmuje realizację skręcania cyklicznego oraz skręcania z nałożonym rozciąganiem lub ściskaniem przy założeniu określonej wartości odkształcenia całkowitego ϵ_c i odkształcenia pojedynczego etapu ϵ_i .

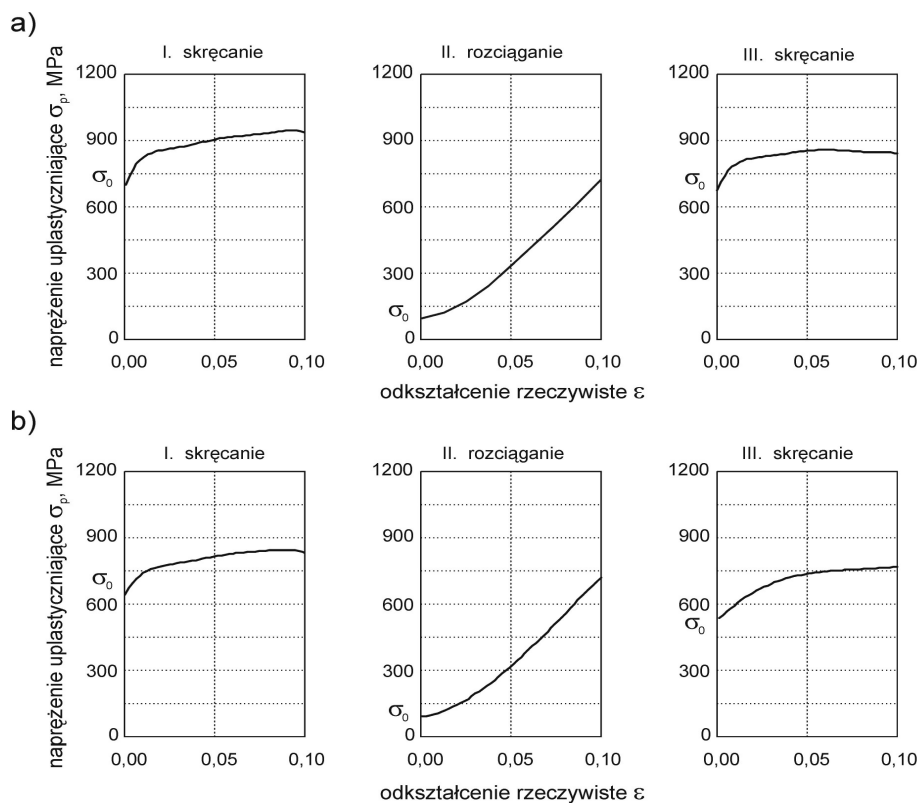
The research of F. Grosman and J. Pawlicki [6,7] speaks for the need of finding a function describing the influence of the path of deformation on the value of flow stress. The course of the value of flow stress obtained as a result of sequential torsion and tensile tests and torsion with change of the sign of torque moment indicates the significant influence of strain history on the value of flow stress.

Experimental studies conducted for many years indicate high material sensitivity to the changes in the direction of external load component action taking place during forming. The purpose of experimental studies and theoretical work is to establish the characteristics of the flow stress of metallic materials and develop a method of identification of a plastic flow model under controlled load conditions [7, 8, 9]. Forming attempts are carried out on a machine for testing materials under complex load conditions. The machine has the capability of manual and computer steering. The system makes it possible to control the course of the tests by setting a specific value of general dislocation parameters: path Δl [mm] and torsion angle α [degrees] and traverse movement speed v_t [mm/min]. The set control parameters activate selected mechanisms of the machines drive in a specified order. The software also makes it possible to simultaneously set load value (axial force, torque moment, internal pressure for pipe samples). During tests, it is possible to visualize measurement results through constant tracking of the course of force curves as a function of time or dislocation. The readings of measured parameters are displayed as numbers or charts. The software also possesses a graphic result presentation module and printing capability.

The range of possible strain variations includes the realization of cyclic torsion as well as torsion with simultaneous tension or compression at a set value of total strain ϵ_c and strain during one stage ϵ_i .

Na wariant odkształcenia składają się odkształcenia uzyskane w warunkach obciążeń odpowiadających prostemu ścisnaniu, rozciąganiu i skręcaniu realizowanych sekwencyjnie lub kombinacji równoczesnego obciążenia. Badania mogą być przeprowadzane dla pełnych próbek walcowych oraz rurkowych o różnych grubościach ścianek. Wyniki badań wykonanych dla wybranej grupy materiałów: miedzi, stopu tytanu i stali wysokostopowej potwierdziły istotny wpływ zmiany schematu obciążenia na wartość sił niezbędnych do realizacji odkształcenia, a tym samym na przebieg funkcji naprężenia uplastyczniającego $\sigma_p = f(\epsilon)$. Przebieg naprężenia uplastyczniającego w funkcji odkształcenia zastępczego dla wariantów odkształcenia skręcanie-rozciąganie-skręcanie przedstawia rys. 2.

The strain variation is comprised of strains obtained under load conditions corresponding to simple compression, tension, and torsion realized sequentially or as a combination of simultaneous loads. Studies can be carried out for whole cylindrical samples and pipes with varying wall thicknesses. The results of tests carried out for a selected group of materials: copper, titanium alloy and highly alloyed steel confirmed a significant influence of a change in the method of load application on the value of force necessary to realize deformation, and so, on the course of the flow stress function $\sigma_p = f(\epsilon)$. The course of flow stress as a function of substitute strain for variants of torsion-tension-torsion strain is shown on fig. 2.



Rys. 2. Wyznaczone dla miedzi zależności naprężenia uplastyczniającego σ_p od odkształcenia rzeczywistego ϵ dla dwóch różnych wariantów odkształcenia: skręcanie-rozciąganie-skręcanie w tym samym kierunku (a) i skręcanie-rozciąganie-skręcanie w przeciwnym kierunku (b) [6]

Fig. 2. Relationships of flow stress σ_p to true strain ϵ , determined for copper, for two different deformation variants: torsion - tension - torsion in the same direction (a) and torsion - tension - torsion in the opposite direction (b) [6]

Uzyskane wyniki wskazały na konieczność opracowania nowej funkcji naprężenia uplastyczniającego, która byłaby możliwa do zastosowania w modelowaniu i projektowaniu procesów kształtowania plastycznego odznaczających się niemonotonicznym i nieproporcjonalnym przebiegiem drogi odkształcenia [10].

3. KONCEPCJE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH WSPOMAGANYCH DODATKOWYMI NAPRĘŻENIAMI ŚCINAJĄCYMI

Przeprowadzone badania podstawowe stały się inspiracją do opracowania koncepcji procesów technologicznych, w których parametry kinematyczne, charakteryzujące ruch narzędzi, decydują o efektach siłowo-energetycznych i strukturalnych procesu obróbki plastycznej i są komplementarne do konwencjonalnych, powszechnie stosowanych technologii [11, 12]. W przyszłości takie sposoby kształtowania plastycznego mogą być przedmiotem zastosowań przemysłowych. Koncepcje nowych procesów technologicznych obróbki plastycznej są weryfikowane na stanowiskach do badań laboratoryjnych. Istota rozwiązań konstrukcyjnych i koncepcje technologiczne są przedmiotem zgłoszeń patentowych [13÷15].

3.1. Kucie z wymuszonym odkształceniem poprzecznym

Stanowisko badawcze, do kształtowania plastycznego wspomagane naprężeniami ścinającymi, wykonane zostało zgodnie z aktualnymi standardami w zakresie sterowania procesem odkształcania i rejestracji danych pomiarowych. Konstrukcja urządzenia jest oryginalnym rozwiązaniem technicznym chronionym zgłoszeniem patentowym [14]. Urządzenie do ściskania z oscylacyjnym skręcaniem (rys. 3) posiada następujące możliwości przeprowadzania prób odkształcania:

- ściskanie konwencjonalne w zróżnicowanych warunkach tarcia np. ściskanie „beztarciowe” lub w różnych warunkach smarowania,

The results obtained indicate the necessity of developing a new function of flow stress, which will be possible to utilize in modeling and designing plastic forming processes distinguished by a non-monotonic and non-proportional course of the deformation path [10].

3. CONCEPTIONS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AIDED BY ADDITIONAL SHEAR STRESSES

The studies conducted have become an inspiration to develop a conception of technological processes in which kinematic parameters, characterizing tool movement, are decisive in determining force, energetic, and structural effects of the plastic working process, and are complementary to the conventional, generally used technology [11, 12]. In the future, such methods of metal forming can be applied industrially. The conceptions of new technological processes of plastic working are verified at laboratory testing stations. The substance of constructional solutions and technological conceptions are the object of patent applications [13÷15].

3.1. Forging with forced transverse strain

The station for researching plastic forming aided by shear stresses has been realized according to valid standards relevant to controlling the strain process and registration of measurement data. The construction of the machine is an original technical solution protected by a patent application [14]. The machine for compression with oscillatory torsion (fig. 3) possesses the following capabilities in terms of carrying out strain tests:

- *conventional compression in various friction conditions i.e. “frictionless” compressions or under various conditions of lubrication,*

- ściskanie konwencjonalne w zamkniętej matrycy z możliwością regulowanego promieniowego płynięcia metalu,
- ściskanie z równoczesnym oscylacyjnym skręcaniem w warunkach swobodnego promieniowego płynięcia metalu.

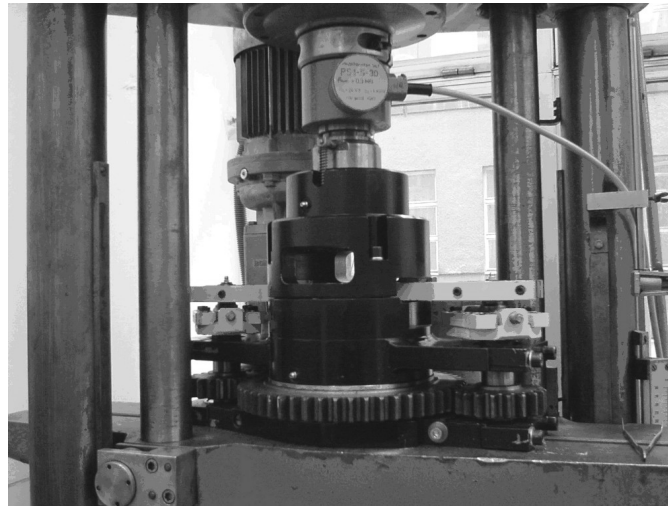
Realizacja wymienionych prób ściskania jest możliwa dzięki przekazywaniu, przez dolny stempel, oscylacyjnego ruchu skręcającego. Drogę odkształcenia można regulować zmieniając proporcje udziału w odkształceniu całkowitym: odkształceń liniowych – wywołanych osiowym ruchem stempla i odkształceń postaciowych – wywołanych obrotowym ruchem stempla. Urządzenie pozwala na realizację testów czułości materiału na zmianę drogi odkształcania oraz prowadzenie technologicznej operacji spęczania z równoczesnym oscylacyjnym skręcaniem.

System sterowania umożliwia regulację prędkości ściskania, częstotliwości skręcania i amplitudy kąta skręcania. Nastawy wielkości kinematycznych umożliwiają płynną zmianę kąta skręcania w zakresie od 0° do $\pm 8^\circ$.

- *conventional compression in a closed die block with the capability of regulated radial metal flow,*
- *simultaneous compression and oscillatory torsion under conditions of free radial metal flow.*

The realization of the listed compression tests is possible thanks to the transfer of oscillatory torsional movement by the lower punch. The deformation path can be regulated by changing the proportions of the participation of the following in total strain: linear strain – caused by axial punch movement and non-dilatational strain – caused by punch rotary movement. The machine allows for the realization of tests of material sensitivity to changes in deformation path as well as for leading the technological operation of upsetting with simultaneous oscillatory torsion.

The control system makes it possible to regulate the rate of compression, torsion frequency, and the amplitude of the torsional angle. Kinematic value settings make it possible to fluently change the torsional angle in a range from 0° to $\pm 8^\circ$.



Rys. 3. Urządzenie do ściskania z oscylacyjnym skręcaniem
 Fig. 3. A device for compression with oscillatory torsion

Częstotliwość skręcania dolnego stempla jest regulowana w zakresie od 0 do 1,8 Hz, z możliwością zwiększenia częstotliwości maksymalnej do 2,6 Hz. Maksymalna prędkość przesuwu dolnego stempla (związana z ruchem trawersy maszyny wytrzymałościowej) wynosi 0,4 m/min. Dopuszczalna siła nacisku wynosi 300 kN. Siła ściskania i droga odkształcenia są rejestrowane komputerowo. W trakcie prób możliwa jest wizualizacja charakterystyk siłowych w czasie rzeczywistym.

Badania zachowania się materiałów w warunkach ściskania z oscylacyjnym skręcaniem przeprowadzono na próbkach z miedzi elektrolitycznej gatunku M1E (rys. 4). Stosowano próbki walcowe o wymiarach początkowych $d_0 = 15$ mm i $h_0 = 22,5$ mm ($h_0/d_0 = 1,5$). Próbkę ściskano stosując gniot $\Delta h = 15$ mm oraz parametry procesu:

- kąta skręcania $\alpha = 0^\circ$ i $\pm 5^\circ$,
- częstotliwości skręcania $f_{skr} = 0$ Hz i 1,0 Hz.

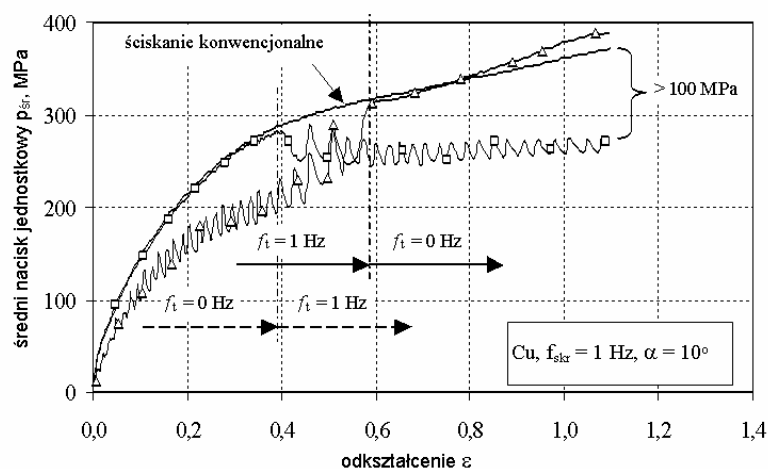
W ramach badań zrealizowano szereg wariantów odkształcenia przy zmiennych parametrach kąta skręcania α i częstości wahań dolnego stempla f_{skr} [16,17,18]. W trakcie prób rejestrowano siłę ściskającą F [kN] w zależności od gniotu Δh [mm] i czasu t [s] oraz moment skręcający M_s [Nm] w zależności od czasu t [s]. Z uzyskanych zależności $F = f(\Delta h)$, $F = f(t)$ i $M_s = f(t)$ wyznaczono wartości naprężeń uplastyczniających dla wybranych zakresów czasowych procesu odkształcania.

Torsion frequency of the lower punch is regulated in a range from 0 to 1,8 Hz, with a possibility of increasing maximum frequency to 2,6 Hz. The maximum travel speed of the lower punch (related to the movement of the testing machine's traverse) is equal to 0,4 m/min. Admissible force of pressure is equal to 300 kN. Force of pressure and path of deformation are registered by a computer. During tests, real time visualization of force characteristics is possible.

Tests of material behavior under conditions of compressions with oscillatory torsion were carried out on samples made from M1E type electrolytic copper (fig. 4). Cylindrical samples with starting dimensions of $d_0 = 15$ mm and $h_0 = 22,5$ mm were used ($h_0/d_0 = 1,5$). The samples were compressed using a reduction of $\Delta h = 15$ mm and the following process parameters:

- *torsional angle $\alpha = 0^\circ$ and $\pm 5^\circ$,*
- *torsion frequency, $f_{tor} = 0$ Hz and 1,0 Hz.*

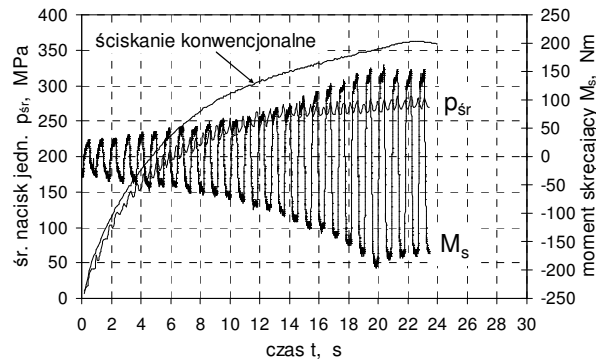
Within the framework of studies, a series of strain variations was realized with varying torsional angles α and lower punch oscillation frequency f_{tor} [16,17,18]. During tests, a compressive force F [kN] was registered in relation to reduction Δh [mm] and time t [s] as well as a torque moment M_s [Nm] in relation to time t [s]. Based on the obtained dependencies $F = f(\Delta h)$, $F = f(t)$ and $M_s = f(t)$ flow stress value for selected time frames of the strain process was determined.



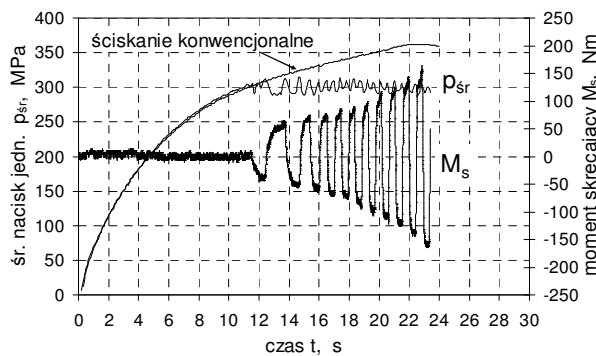
Rys. 4. Wpływ zróżnicowania drogi odkształcenia na średni jednostkowy nacisk kształtowania p_{sr} [7]

Fig. 4. The effect of deformation path variation on a value of the mean unit pressure p_{sr} [7]

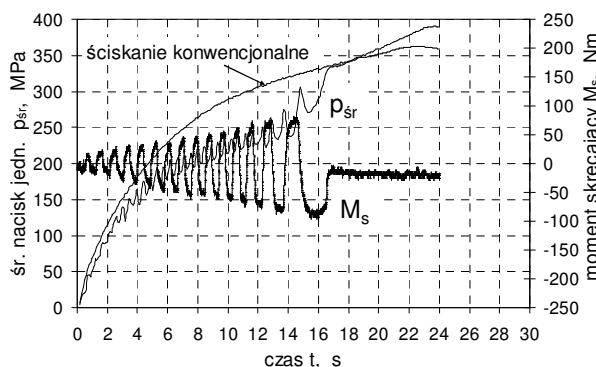
a)



b)



c)

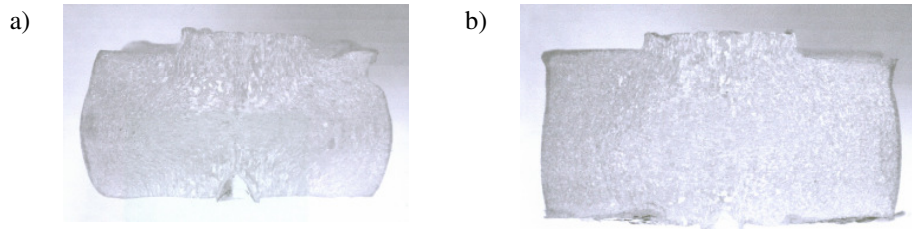


Rys. 5. Przebieg średnich nacisków jednostkowych p_{sr} i momentu skręcającego M_s dla różnych wariantów odkształcania: a) ściskanie i skręcanie, b) ściskanie do 12 sek. + ściskanie i skręcanie, c) ściskanie i skręcanie do 16 sek. + ściskanie

Fig. 5. The courses of mean unit pressure p_{sr} and torsional moment M_s for different deformation variants: a) compression and torsion, b) compression to 12 sec. + compression and torsion, c) compression and torsion to 16 sec. + compression

Wyniki badań potwierdziły istotne oddziaływanie drogi odkształcania na przebieg charakterystyk siłowych (rys. 5) i strukturę materiałów (rys. 6) poddanych ściskaniu z oscylacyjnym skręcaniem w porównaniu do ściskania konwencjonalnego. Na rys. 5 przedstawiono charakterystyki średnich nacisków jednostkowych uzyskane podczas ściskania w warunkach zmiany drogi odkształcania w trakcie realizacji próby. Oscylacyjny ruch dolnego stempla wywołuje wyraźny spadek wartości nacisków w dowolnej fazie procesu ściskania.

Study results confirmed significant influence of the deformation path on the course of force characteristic curves (fig. 5) and material structure (fig. 6) subjected to compression with oscillatory torsion in comparison to conventional compression. Fig. 5 presents mean unit pressure characteristic curves obtained during compression under conditions of a change in deformation path during testing. The oscillatory movement of the lower punch causes a significant decrease in pressure values during any phase of the compression process.



Rys. 6. Makrostruktura próbek po odkształcaniu: konwencjonalnym (a) oraz z udziałem skręcania (b)
 Fig. 6. Macrostructure of the samples after conventional compression (a) and after simultaneous compression and torsion (b)

Z wykresów przebiegów średnich nacisków jednostkowych p_{sr} i odpowiadających wartości momentu skręcającego M_s w zależności od czasu t , uzyskanych dla przeprowadzonych wariantów schematów obciążenia, wynika ścisła korelacja pomiędzy wartością nacisków a oddziaływaniem dodatkowego odkształcenia od oscylacyjnego skręcania.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowy przebieg charakterystyk $p_{sr}=f(t)$ i $M_s=f(t)$ dla wariantu odkształcania, w trakcie którego w końcowej fazie procesu przebieg odkształcenia miał charakter konwencjonalny. Brak oddziaływania na materiał oscylacyjnego skręcania wywołuje efekt natychmiastowego wzrostu nacisków do poziomu odpowiadającego ścisłaniu konwencjonalnemu. Podobne efekty zmiany nacisków wywołane oddziaływaniem oscylacyjnego momentu skręcającego uzyskano dla pozostałych analizowanych przebiegów drogi odkształcenia.

Rozkład odkształceń lokalnych po procesie ścisłania z równoczesnym skręcaniem jest niejednorodny. Dla uzyskania jednorodnego odkształcenia w całej objętości odkształcanego materiału, zaprojektowany został przyrząd wprowadzający dodatkowe odkształcenie postaciowe przez wymuszenie ruchu prostopadłego do kierunku nacisku kowadeł ścisłających (rys. 7).

Zasada działania przyrządu polega na zamianie momentu obrotowego, przekazanego z napędu na wieniec zębaty, poprzez mechanizm mimośrodowy na ruch posuwisto-zwrotny poziomy obejmujący matrycę (rys. 7). W wyniku tego ruchu, materiał ścisłany pomiędzy stemplem a matrycą jest poddawany cyklicznemu obciążeniu poprzeczną siłą wywołującą występowanie w odkształcanym

An exact correlation between the values of pressure and the influence of additional strain from oscillatory torsion takes place based on the charts of the courses of mean unit pressure p_{avg} and corresponding values of torsional moment M_s in relation to time t , obtained for conducted variations of load schemes.

Fig. 5 shows an example the course of the characteristic curve $p_{avg}=f(t)$ and $M_s=f(t)$ for a strain variant, during which, in the final phase of the process, the course of strain had a conventional character. Lack of influence of oscillatory torsion on the material creates an effect of immediate increase of pressure to the level corresponding to conventional compression.

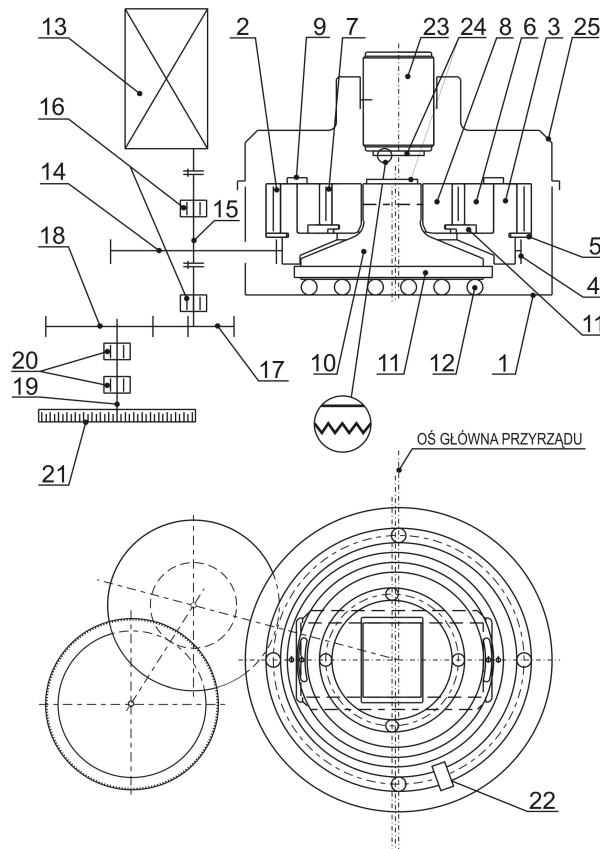
Similar effects of changes in pressure caused by the influence of oscillatory torsional moment were obtained for the remaining analyzed courses of deformation path.

The distribution of local strain after the compression process with simultaneous torsion is non-uniform. A device introducing additional non-dilatational strain by forcing movement perpendicular to the direction of pressure from the compression anvils was designed in order to obtain uniform strain in the entire volume of the deformed material (fig. 7).

The principle of the device's action is based on the exchange of rotary moment, transferred from the drive to the toothed ring, by means of an eccentric mechanism to a reciprocating horizontal moment of the die clamping ring (fig. 7). As a result of this movement, the material compressed between the punch and the die is subjected to cyclic

materiale dodatkowych naprężeń ścinających, co wpływa na poprawę warunków wypełniania wykrojów matrycy, zmianę struktury i właściwości materiału, a w rezultacie na zmniejszenie ilości, wynikających z lokalnych efektów utraty spójności materiału, braków przy produkcji półfabrykatów. Cechą szczególną przyrządu jest możliwość płynnej regulacji wielkości mimośrodowości, a w efekcie amplitudy przemieszczeń w ruchu posuwisto-zwrotnym oprawy matrycy. W celu umożliwienia dokładnej nastawy wielkości mimośrodu, przyrząd wyposażony jest w tarczę wskaźnikowo-nastawczą. Przyrząd pozwala na bezstopniową regulację wielkości amplitudy i częstości przemieszczeń oprawy matrycy.

loading by a transverse force causing additional shear stresses in the deformed material, which influences the improvement of conditions of filling die impressions, changes in structure, and material properties, and, as a result, causes a decrease in the amount of discard in semi-finished product production due to the local effects of loss of material coherence. A specific property of the device is the capability of fluent regulation of the eccentricity value, and in effect, the amplitude of shift in the reciprocating movement of the die mount. To make the precise setting of the eccentricity value possible, the device is equipped with a setting and indicating dial. The device allows for the stepless regulation of the amplitude value and the frequency of die mount shifting.



Rys. 7. Schemat przyrządu do kucia z wymuszonym odkształceniem poprzecznym: 1 - korpus dolny, 2 - łożysko toczne zewnętrzne, 3 - pierścień mimośrodowy zewnętrzny, 4 - wieniec zębaty, 5 - pierścień oporowy, 6 - pierścień mimośrodowy wewnętrzny, 7 - łożysko toczne wewnętrzne, 8 - pierścień prowadzący, 9 - pierścień sprzęgający, 10 - oprawa matrycy, 11 - listwy ślizgowe, 12 - rolki toczne, 13 - napęd, 14 - koło zębate pośredniczące, 15 - wał, 16 - łożyska, 17 - koło zębate napędzające, 18 - koło zębate, 19 - wał, 20 - łożyska, 21 - tarcza wskaźnikowo-nastawcza, 22 - rygiel, 23 - korpus górny, 24 - stempel, 25 - wkładka

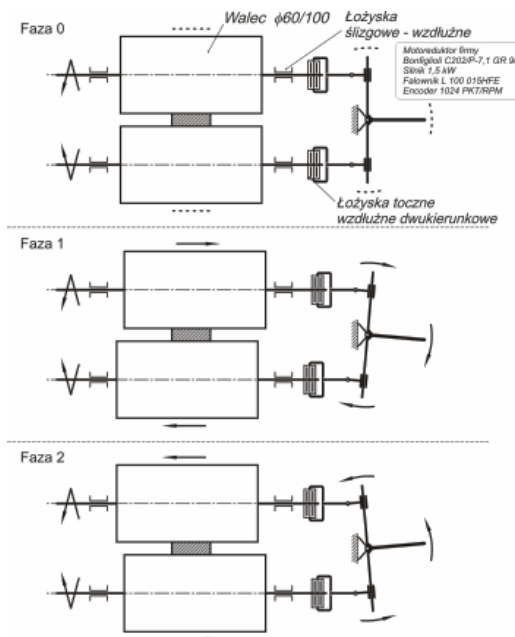
Fig. 7. Schematic representation of a device for forging with forced transverse shear deformation: 1 - lower body, 2 - external rolling bearing, 3 - external eccentric ring, 4 - toothed wheel rim, 5 - stopper ring, 6 - internal eccentric ring, 7 - internal rolling bearing, 8 - guide ring, 9 - coupling ring, 10 - die mounting, 11 - linear float guide, 12 - rollers, 13 - drive, 14 - coupling gear, 15 - shaft, 16 - bearings, 17 - driving gear, 18 - gear, 19 - shaft, 20 - bearings, 21 - indicating / adjusting dial, 22 - bolt, 23 - upper body, 24 - punch, 25 - insert

3.2. Walcowanie z poosiowym ruchem walców

W procesie walcowania, wspomaganego dodatkowymi naprężeniami ścinającymi, 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 boczce walców znajdują się obwodowe rowki. Maksymalna wielkość wychylenia poosiowego walców wynosi ± 2 mm, co pozwala na uzyskanie amplitudy przemieszczenia powierzchni roboczych walców 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 [19]. Schemat kinematyczny mechanizmu pozwalającego na cykliczny, poosiowy ruch walców w trakcie walcowania przedstawiono na rys. 8.

3.2. Rolling with axial roll movement

During the rolling process, aided by additional shear stresses, the effect of change of deformation path is caused by the introduction of an additional, cyclic axial movement of working rolls. In order to conduct experimental studies of this process, it was necessary to build a special laboratory rolling machine making such tool movement possible. The laboratory rolling machine has two working rolls with diameters of 60 mm each. The working rolls can move axially in opposite directions during rolling. In order to transfer the transverse movement of the rolls to the deformed material, circumferential grooves are found on the roll faces. The maximum value of axial deflection of the rolls is equal to ± 2 mm, which makes it possible to obtain amplitude of shift of working roll surfaces equal to 8 mm. Axial roll movement frequency can be adjusted in a range from 0 to 3 Hz, similarly to roll rotational speed ranging from 0 to 20 rpm [19]. The kinematic scheme of the mechanism allowing for cyclic, axial roll movement during rolling is presented on fig. 8.



Rys. 8. Schemat kinematyczny walcarki z cyklicznym, poosiowym ruchem walców [4]
Fig. 8. Kinematic scheme of the rolling mill with cyclic, axial movement of rolls [4]

Tablica 1. Parametry procesu walcowania ze zmianą drogi odkształcenia zastosowane w badaniach
 Table 1. Parameters of the rolling process with cyclic change of the strain path used in the research

Wielkość gniotu, ϵ_n , [%] <i>Reduction value</i> ϵ_b , [%]	Prędkość walcowania v_w , [m/s] <i>Rolling speed</i> v_w , [m/s]	Częstotliwość ruchu poosiowego walców f , [Hz] <i>Roll axial movement</i> <i>frequency</i> f , [Hz]	Amplituda ruchu poosiowego walców A , [mm] <i>Roll axial movement</i> <i>amplitude</i> A , [mm]
5	0,022	1	1,4
10	0,044	2	2,8
20	0,063	3	4,0

Badania procesu walcowania z cyklicznym poosiowym ruchem walców prowadzone są od wielu lat. Obejmowały one m.in. wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów prowadzenia procesu walcowania z punktu widzenia kształtu odwalcowanego pasma [20], badania efektu cieplnego powstającego w trakcie walcowania [21] oraz próby uzyskania materiałów o strukturze nanometrycznej [22]. W ostatnim czasie główny nacisk w badaniach został położony na określenie pracy odkształcenia niezbędnej do prowadzenia procesu walcowania z cyklicznym, poosiowym ruchem walców.

Materiałem do badań była miedź elektrolityczna M1E. Wymiary początkowe pasm wynosiły 8x8x100mm (bxxh1) i były podyktowane możliwościami napędu walcarki. Parametry prowadzenia procesu walcowania zostały dobrane na podstawie wcześniejszych badań i zostały przedstawione w tablicy 1.

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. 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.

Studies of the rolling process with cyclic, axial roll movement have been conducted for many years. They encompassed, among other things, determination of the most beneficial parameters for the rolling process in terms of the shape of the rolled band [20], studying the thermal effect created during rolling [21] and an attempt to obtain materials with a nanometric structure [22]. In recent times, emphasis in studies has been put on determining the work of deformation necessary to carry out the rolling process with cyclic, axial roll movement.

The material used for studies was M1E electrolytic copper. The starting band dimensions were equal to 8x8x100mm (bxxh1) and were based on the rolling machine's drive capabilities. The parameters for carrying out the rolling process were selected based on earlier studies and have been presented on table 1.

Depending on the accepted variant of the rolling process, 3 to 9 roll passes were carried out. The research program also encompassed carrying out conventional roll passes in order to define the level of reference for effects obtained in processes with a cyclically variable deformation path. In the literature, up to this point, strain processes with changes in deformation path were defined as energy-saving due to the capability of lowering pressure force in the process. However, these considerations did not take into account the energy necessary for carrying out the additional, axial movement of the forming tools.

Praca odkształcenia w procesie walcowania konwencjonalnego jest wyznaczana jako iloczyn momentu walcowania oraz kąta obrotu walców roboczych. W procesie walcowania z wymuszonym poosiowym ruchem walców 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 przedstawiono na rysunku 9.

Porównanie wielkości pracy odkształcenia w procesie walcowania konwencjonalnego z procesem MEFASS wykazało, że prowadzenie procesu wspomaganego naprężeniami ścinającymi wymaga zdecydowanie większej energii (rys. 10).

Szczególnie w przypadku prowadzenia procesu z niewielkimi prędkościami walcowania, wymaganymi ze względu na wspomniane wcześniej korzystne warunki odkształcania 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 [23], zastosowanie niewielkich prędkości walcowania pozwala na uzyskanie najlepszych rezultatów z punktu widzenia kształtu pasma oraz jednorodności odkształcenia w objętości materiału.

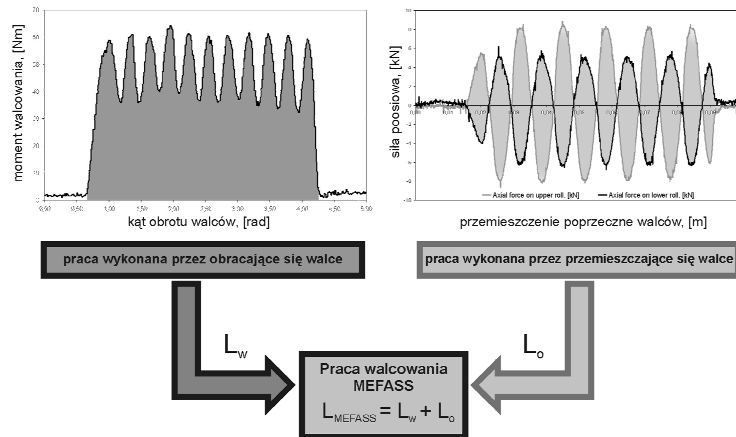
Dla dokonania prawidłowej oceny energochłonności procesu należy jednak odnieść wielkość wykonanej pracy odkształcenia do objętości odkształconego materiału i wielkości uzyskanego odkształcenia. Wielkość względnej pracy odkształcenia w procesie walcowania z wymuszonym odkształceniem poprzecznym, obliczona z przytoczonych wzorów daje bardzo korzystne wyniki w stosunku do względnej pracy odkształcenia w procesie konwencjonalnym.

Deformation work in the conventional rolling process is defined as the product of rolling moment and the working roll rotation angle. During the rolling process with forced axial roll movement, it is necessary to take into account the work carried out not only by the roll's rotational movement, but also by the cyclic axial movement. Work related to transverse roll movement was determined as the product of axial force and the value of the roll's shift. The method of determining the work of deformation in the rolling process is presented on figure 9.

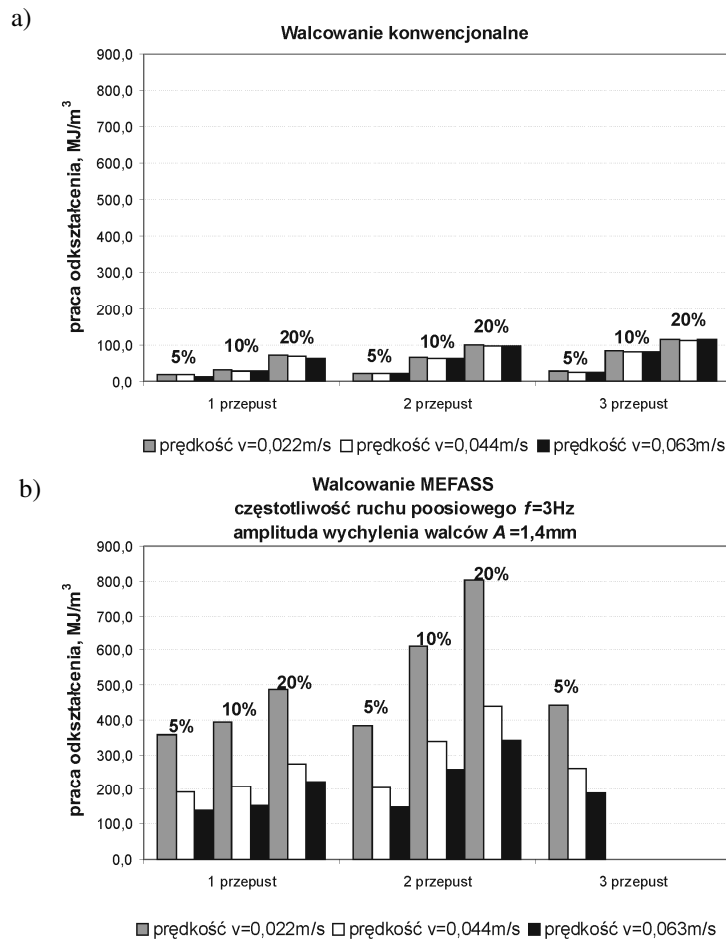
A comparison of the value of deformation work during conventional rolling with the MEFASS process showed that carrying out the process aided by shear stresses requires a decidedly greater amount of energy (fig. 10).

Especially in the case of carrying out this process with small rolling speeds, which were required due to the above mentioned beneficial conditions of strain in the roll gap, the amount of energy necessary to carry out the rolling process exceeds the energy necessary to carry out a conventional rolling process by several times. This is a result of a large amount of axial roll movements corresponding to a unit of band volume. Decreasing rolling speed causes an increase in the amount of axial roll movement cycles. As the research presented in works [23] shows, applying small rolling speeds allows for the obtainment of the best results in terms of band shape and strain uniformity in the entire volume of the material.

In order to correctly evaluate the energy consumption of the process, the amount of deformation work done should be related to the volume of the deformed material and the degree of deformation obtained. The amount of relative deformation work in the rolling process with forced transverse strain, calculated from the above formulas, gives very beneficial conditions compared to the relative deformation work in a conventional process.



Rys. 9. Schemat wyznaczenia pracy w procesie walcowania z cykliczną zmianą schematu obciążenia - MEFASS
 Fig. 9. A diagram of deformation work evaluation in a rolling process with cyclic change of the loading scheme – MEFASS



Rys. 10. Porównanie wykonanej pracy w procesie walcowania konwencjonalnego (a) oraz walcowania z cyklicznym, poosiowym ruchem walców (MEFASS) (b)

Fig. 10. Comparison of deformation work in the conventional rolling process (a) and the rolling process with cyclic axial movement of rolls (MEFASS) (b)

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w opracowaniu nowe, niekonwencjonalne procesy przeróbki plastycznej otwierają szerokie perspektywy wykorzystania odkształcania wspomaganego dodatkowymi naprężeniami ścinającymi w procesach przemysłowych. 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. Rozwiązania te są chronione zgłoszeniami patentowymi [8-12]. Aktualny stan rozpoznania możliwości praktycznego zastosowania jest w fazie wstępnych badań. Kontynuowanie badań pozwoli na uzyskanie pełnej informacji o efektach wprowadzenia wspomaganego procesów kształtowania plastycznego dodatkowymi naprężeniami ścinającymi. Szczególnie ważne jest uzyskanie informacji o skutkach jakie spowoduje w zakresie energochłonności procesu kształtowania plastycznego, równomierności rozkładu odkształceń plastycznych, ewolucji struktury metalu w specyficznych warunkach odkształcenia i jej wpływie na plastyczne płynięcie metalu w aspekcie właściwości technologicznych i użytkowych.

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

4. CONCLUSIONS

The new, unconventional plastic working processes presented in this work open wide perspectives of applying deformation aided by additional shear stresses in industrial processes. The fundamental advantages of new forming methods are as follows:

- *it is possible to obtain large plastic deformations through cold working, without the necessity of heat treatment between operations,*
- *it is possible to significantly decrease the force of pressure from forming tools,*
- *less energy is needed to obtain the required value of substitute strain,*
- *it is possible to obtain an ultra fine grain (which likely includes nanometric) material structure,*
- *obtainment of atypical sets of functional properties of ready products.*

The methods of plastic working presented in the article are original, Polish achievements in the area of technical and technological solutions. These solutions are protected by patent applications [8-12]. The actual state of ascertaining the possibility for practical applications is in the phase of initial testing. Continuing research will allow for the obtainment of complete information on the effects of introducing plastic forming processes aided by additional shear stresses. It is especially important to obtain information on the effects which it will cause regarding plastic forming energy consumption, plastic deformation distribution uniformity, metal structure evolution under specific strain conditions and its influence on metal plastic flow as an aspect of functional and technological properties.

Research work financed from resources for learning in the years 2006-2009 as the development project R 0702601.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Korbel A., Bochniak W.: Some new energy saving technological solutions in metal forming. Congress on Metallurgy and Materials Technology, ABM, Sao Paulo, 10, 315-324, (1994).
- [2] Pęcherski R.B.: Opis deformacji plastycznej metali z efektami mikropasm ścinania. Rozprawa habilitacyjna. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, (1998).
- [3] Pidvysotski V., Szyndler R., Kusiak J., Pietrzyk M.: Modeling of forging of gear-wheel using reversibly rotating die, 6th Esaform Conference on Material Forming, ed. Brucato V., Salerno, 943-946, (2003).
- [4] Grosman F.: Application of a flow stress function in programmes for computer simulation of plastic working processes, Journal of Materials Processing Technology, 64, 169-180, (1997).
- [5] Grosman F.: Criteria of flow stress function choice for numerical simulation of plastic forming processes, International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials, Thermec'97, University of Wollongong, Australia, II, 2047-2052, (1997).
- [6] Grosman F., Pawlicki J.: Plastyczność w warunkach wymuszonej drogi odkształcenia, Mat. konf. Forming'2002, Luhacovice, Czechy, 99-102, (2002).
- [7] Grosman F., Pawlicki J.: Concepts of technological applications in controlled deformation of materials, 7th Int. Conf. on Technology of Plasticity, Yokohama, Japan. Advanced Technology of Plasticity, 1, 1219-1224, (2002).
- [8] Pawlicki J., Grosman F.: Wpływ zmiany orientacji osi głównych stanu naprężenia na wartość naprężenia uplastyczniającego, Rudy i Metale Nieżelazne, 11, 501-503, (1997).
- [9] Pawlicki J., Grosman F.: Wpływ przebiegu odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego materiałów polikrystalicznych, Rudy i Metale Nieżelazne, 11, 565-568, (1999).
- [10] Grosman F.: Flow-stress functions for the computer simulation of metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 106, 45-48, (2000).
- [11] Grosman F., Pawlicki J.: Concepts of technological applications in controlled deformation of materials. Proceedings of the 7th International Conference on Technology of Plasticity, Advanced Technology of Plasticity, Japan, vol.1, 2002, pp. 1219-1224.
- [12] Grosman F., Pawlicki J.: Processes with forced deformation path, Proceedings of the 1th International Conference on New Forming Technology, Harbin, China, 2004, pp. 361-366.
- [13] Grosman F. (i in.): Zgłoszenie do Urzędu Patentowego RP nr P-361148 wynalazku pt. Sposób walcowania, zwłaszcza metali oraz klatka walcownicza do walcowania, zwłaszcza metali.
- [14] Grosman F., Kurzydłowski K.J., Pawlicki J., Tomecki L.: Zgłoszenie patentowe nr P.379858 (2006.06.06) pt.: "Przyrząd do obróbki plastycznej metali".
- [15] Grosman F., Kurzydłowski K.J., Pawlicki J., Tomecki L.: Zgłoszenie patentowe nr P.379860 (2006.06.06) pt.: "Sposób plastycznego kształtowania wyrobów metalowych i przyrząd do plastycznego kształtowania wyrobów metalowych".
- [16] Grosman F., Pawlicki J.: Processes with forced deformation path. 1th Int. Conf. on New Forming Technology, Harbin, China, 361-366, (2004).
- [17] Pawlicki J., Grosman F.: Analiza efektów siłowo-energetycznych dla procesów z wymuszoną drogą odkształcenia, Rudy i Metale Nieżelazne, 10-11, 479-483, (2003).
- [18] Pawlicki J., Grosman F.: Charakterystyki materiałowe dla oscylacyjnego skręcania. Mat. Konf. FiMM 2003 „Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów obróbki plastycznej”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, 201, 139-144, (2003).
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Cyganek Z., Grosman F.: Influence of MEFASS rolling parameters on temperature of formed strip, Acta Metallurgica Slovaca, 2007, vol. 13, nr 2, s. 156-162.
- [22] 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.
- [23] Cyganek Z.: Analiza procesu walcowania metodą MEFASS w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych. Sprawozdanie z pracy BW-505/RM-2/2007 (nie publikowane).