



Rozwój procesów narastającego kształtowania plastycznego metali

The development of incremental metal forming processes

F. Grosman*

Politechnika Śląska; Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii; Instytut Technologii Metali, Zakład Mechaniki i Przeróbki Plastycznej, ul. Z. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 20.08.2014
Data recenzji: 29.10.2014
Data akceptacji: 16.03.2015

Streszczenie

Poszukiwanie nowych możliwości oddziaływania na właściwości użytkowe wyrobów wytwarzanych w procesach obróbki plastycznej metali skupia się aktualnie na znajdowaniu rezerw jakie tkwią w procesach już znanych oraz znajdowaniu nowych, innowacyjnych procesów narastającego kształtowania plastycznego. Przeprowadzono klasyfikację procesów obróbki plastycznej i na tym tle podana została definicja procesów charakteryzujących się narastającym odkształceniem plastycznym. Opisane zostały procesy narastającego kształtowania plastycznego znajdujące się obecnie na etapie badań wstępnych. Scharakteryzowane zostały możliwe do osiągnięcia efekty i najistotniejsze cechy dla następujących procesów: wyciskania współbieżnego i promieniowego KOBO, cyklicznego wyciskania spęczającego, wyciskania przez kanał kątowy, kucia wspomagane działaniem dodatkowych, cyklicznych naprężeń ścinających (stycznych), walcowania z wymuszoną drogą odkształcenia, kształtowania segmentowego. W procesach tych ze względu na rewersyjny i cykliczny charakter sił kształtowania, przebieg odkształceń lokalnych jest niemonotoniczny. Dla procesów o niemonotonicznym i nieproporcjonalnym przebiegu odkształcenia konieczne jest uwzględnienie, w opisie funkcji naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia granicznego, parametrów opisujących historię przebiegu odkształcenia plastycznego. Wykonano badania, w których próbki poddawane były prostym próbom rozciągania, ściskania i skręcania, rewersyjnego rozciągania ze ściskaniem, rewersyjnego skręcania oraz złożonym obciążeniom: rozciągania połączonego z rewersyjnym skręcaniem, ściskania połączonego z rewersyjnym skręcaniem. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono graficznie i analitycznie funkcje opisujące wpływ historii obciążania na naprężenie uplastyczniające i odkształcenie graniczne. W podsumowaniu zestawiono najistotniejsze korzyści jakie można uzyskać w innowacyjnych, objętościowych procesach narastającego odkształcenia plastycznego.

Słowa kluczowe: obróbka plastyczna, kształtowanie narastające, kształtowanie objętościowe, procesy innowacyjne

Article info

Received: 20.08.2014
Reviewed: 29.10.2014
Accepted: 16.03.2015

Abstract

At the moment, seeking new possibilities of influencing utilization properties of products manufactured by the processes of metal forming is focused on reserves which can be found in the known processes and on finding new, innovative processes of incremental plastic forming. A classification of plastic forming processes has been performed and, on that background, definition of the processes characterized by incremental plastic strain has been stated. The processes of incremental plastic forming, currently at the stage of initial investigation, have been described. Achievable effects and the most important features have been described for the following processes: forward and radial extrusion by the KOBO method, cyclic extrusion upsetting, extrusion through an angular channel, forging boosted by additional shear stresses (tangential ones), rolling with forced deformation path, segmental forming. Due to the reversion and cyclic character of the forming forces, the pro-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 32 603 44 59; e-mail: franciszek.grosman@polsl.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 32 603 44 59; e-mail: franciszek.grosman@polsl.pl

gress of local deformations is not monotonic. For the processes not monotonic and unproportional progress of deformation, it is necessary to consider the parameters describing the history of plastic strain in the description of the functions of the yield stress and deformation limit. Examinations have been performed in which samples have been subjected to simple tensile tests, compression tests and reversion tensile and compression tests, tests of reversion twisting, as well as to complex loads: stretching combined with reversion twisting, compression combined with reversion twisting. Basing on the obtained results, the functions describing the influence of loading history on the yield stress and deformation limit, have been graphically and analytically determined. In the conclusion, the most important advantages which can be obtained in innovative volumetric processes of incremental plastic deformation.

Keywords: metal forming, incremental forming, bulk forming, innovative processes

1. WPROWADZENIE

Zdefiniowanie procesu narastającego kształtowania objętościowego wymaga jednoznacznego określenia terminów: kształtowanie objętościowe i kształtowanie narastające. Dla wymienionych procesów przyjęte zostały następujące definicje. **Kształtowanie objętościowe** jest procesem przeróbki plastycznej polegającym na zamierzonej zmianie wymiarów materiału wsadowego co najmniej w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Wsadem do kształtowania objętościowego jest materiał o kształcie geometrycznym odznaczającym się współmiernością wymiarów w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Cechą charakterystyczną **kształtowania narastającego** jest realizacja całkowitego odkształcenia plastycznego, poprzez wykonanie wielokrotnych odkształceń pojedynczych, spowodowanych przez nacisk (statyczna realizacja obciążenia) lub uderzenie (dynamiczna realizacja obciążenia). Dla tak zdefiniowanych procesów dokonano przeglądu procesów kształtowania plastycznego, które zostały stosunkowo niedawno opracowane i można je uznać za innowacyjne procesy obróbki plastycznej metali. Innowacyjność tych procesów polega często na modyfikacji klasycznych procesów obróbki plastycznej poprzez wprowadzenie dodatkowych sił nacisku na odkształcany materiał, co może skutkować zmianą schematu stanu naprężenia w odkształcanym materiale, a co zatem idzie również schematem stanu odkształcenia. Dodatkowa siła może również wymuszać dodatkowe przemieszczenie odkształcanego materiału. W artykule przyjęto, że tylko te procesy, w których występuje efekt dodatkowe-

1. INTRODUCTION

Defining the bulk incremental forming process requires the unequivocal definition of the concepts: bulk forming and incremental forming. The following definitions have been accepted for these processes. **Bulk forming** is a metal forming process based on an intended change of the dimensions of a stock material in at least two mutually perpendicular directions. The stock in bulk forming is a material with a geometrical shape distinguished by commensurability of dimensions in three mutually perpendicular directions. A characteristic feature of **incremental forming** is the realization of total plastic deformation, by performing multiple individual deformations caused by pressure (static application of load) or impact (dynamic application of load). A review of metal forming processes that have been developed relatively recently has been conducted for processes defined in this manner, and these processes can be considered to be innovative metal-forming processes. This innovation is often based on modifications of classical metal forming processes through the introduction of additional forces pressing down on the material that is being deformed, which may result in a change of the scheme of the stress state in the material subject to deformation, and thus, in a change of the scheme of the strain state. Additional force may also impose additional displacement deformation of the material subject to deformation. It was accepted in this article that only those processes in which the effect of additional material displacement deformation takes place may be included among incremental metal

go przemieszczenia materiału mogą być włączone do procesów narastającego kształtowania plastycznego. W tych procesach możliwe jest uzyskanie bardzo dużych odkształceń plastycznych, pozwalających na otrzymanie struktury ultra drobnoziarnistej lub nanostruktury.

Procesy kształtowania plastycznego, w których wymuszone jest dodatkowe przemieszczenie materiału, określane są w literaturze, jako procesy z wymuszoną drogą odkształcenia. Dla takich procesów stwierdzono występowanie efektów strukturalnych [1–4] i siłowo energetycznych [1, 2, 4–7], które nie pozwalają na zastosowanie klasycznych opisów mechanizmów odkształcenia plastycznego i klasycznych hipotez wyężeniowych oraz funkcji naprężenia uplastyczniającego do analizy płynięcia materiału i opisu stanów mechanicznych, termicznych i strukturalnych odkształcanego materiału. Uzyskane dla różnych dróg odkształcenia wyniki badań eksperymentalnych wykazały jednoznacznie, że opis funkcji naprężenia uplastyczniającego wymaga wprowadzenia do zestawu zmiennych niezależnych, opisujących parametry charakteryzujące warunki realizacji procesu kształtowania plastycznego (odkształcenie, prędkość odkształcenia, temperatura), parametrów opisujących historię przebiegu odkształcenia plastycznego [8–11].

Aktualny stan wiedzy pozwala stwierdzić, że procesy narastającego kształtowania plastycznego istotnie rozszerzają, w odniesieniu do klasycznych procesów obróbki plastycznej, zakres możliwości oddziaływania na strukturę i właściwości wyrobów. Dodatkową zaletą tych procesów jest zmniejszenie wymaganych sił nacisku oraz pracy odkształcenia plastycznego.

2. DEFINICJA PROCESÓW NARASTAJĄCEGO KSZTAŁTOWANIA PLASTYCZNEGO

Proces narastającego kształtowania plastycznego jest procesem obróbki plastycznej metali, w którym finalny wyrób uzyskuje się poprzez konsekwentną realizację wymaganego, w lokalnych strefach materiału wsadowego, odkształcenia plastycznego przy użyciu jednego zestawu (kompletu) narzędzi, poprzez wykonanie wielokrotnych odkształceń pojedynczych, spowodowanych przez nacisk (statyczna realizacja obciąż-

forming processes. It is possible to achieve very high strain in these processes, allowing to obtain an ultra-fine grained structure or nanostructure.

Metal forming processes in which additional material displacement is forced are termed in the literature as processes with a forced deformation path. The occurrence of structural effects [1–4] and force-energy effects [1, 2, 4–7] has been determined in these processes, and these effects do not allow for the application of classical descriptions of plastic deformation mechanisms and classical effort hypotheses, as well as flow stress functions, for analysis of material flow and description of the mechanical, thermal, and structural states of the material subject to deformation. The results of experimental tests obtained for various deformation paths unequivocally showed that the description of the flow stress function must be introduced into the set of independent variables describing parameters characterizing the performance conditions of the metal forming process (strain, strain rate, temperature), parameters describing the deformation history [8–11].

The current state of knowledge allows for the statement that incremental forming processes significantly expand the range of capabilities of microstructure evolution and properties of products compared to classical metal forming processes. These processes also have the additional advantage of reduced required press load and reduced work performed by plastic deformation.

2. DEFINITION OF INCREMENTAL FORMING PROCESSES

An incremental forming process is a metal forming process in which the final product is obtained through the consistent realization of the plastic deformation required in local zones of the stock material by means of a single tool set, through the execution of multiple individual deformations caused by pressure (static load application) or impact (dynamic load application), which, in consequence, lead to the obtainment of

ciężenia) lub uderzenie (dynamiczna realizacja obciążenia), które w konsekwencji prowadzą do uzyskania wyrobu lub półwyrobu o pożądanych cechach geometrycznych (kształt, wymiary, stan powierzchni) oraz właściwościach (strukturze) materiału.

Procesy obróbki plastycznej metali dzieli się w zależności od kształtu (cech geometrycznych) materiału wsadowego na: kształtowanie objętościowe i kształtowanie powłok. W tym opracowaniu problematyka będzie dotyczyła jedynie procesów kształtowania objętościowego. Klasyfikacja procesów kształtowania narastającego jest przede wszystkim związana z ogólną klasyfikacją procesów obróbki plastycznej metali, dla której podstawowymi kryteriami podziału są: temperatura i prędkość odkształcenia (decydujące o przebiegu zjawisk odbudowy struktury: rekrytalizacja i zdrowienie), kształt (geometria) materiału wsadowego, rodzaj (kształt) narzędzia oraz sposób przeniesienia napędu do narzędzia oraz siły i energii do kształtowanego materiału wsadowego.

W zależności od zachodzących w trakcie procesu kształtowania plastycznego zjawisk odbudowy struktury rozróżniamy:

- obróbkę plastyczną na zimno – nie zachodzą zjawiska odbudowy struktury,
- w podwyższonych temperaturach – zachodzą jedynie procesy zdrowienia i możliwa jest niepełna rekrytalizacja,
- na gorąco – zachodzą w pełni procesy rekrytalizacji.

W zależności od rodzaju materiału wsadowego rozróżniamy procesy:

- kształtowania objętościowego (materiały wsadowe: wlewki, pręty),
- kształtowania powłok (materiały wsadowe: blachy, taśmy).

W zależności od kształtu (geometrii) materiału wsadowego, rodzaju narzędzi i sposobu przeniesienia napędu do narzędzi, jak również przekazania siły i energii do kształtowanego materiału wsadowego rozróżnia się:

- kucie swobodne,
- kucie matrycowe,
- wyciskanie,
- walcowanie,

a product or semi-finished product with the desired geometrical features (shape, dimensions, surface state) and properties (microstructure) of the material.

Metal forming processes are classified depending on the shape (geometrical features) of the stock material, into the following types of processes: bulk forming and sheet forming. The subject matter of this paper concerns only bulk forming processes. The classification of incremental forming processes is related, above all, to the general classification of metal forming processes, for which the basic classification criteria are: strain, temperature and strain rate (deciding the course of structural reconstruction phenomena: recrystallization and recovery), shape (geometry) of the stock material, type (shape) of the tool, and method of drive transmission to the tool, as well as the forces and energies required to form the stock material.

Depending on the reconstruction phenomena taking place during the metal forming process, the following types of plastic working are distinguished:

- *cold forming – no structural reconstruction phenomena take place,*
- *forming at elevated temperatures – only recovery processes take place, and incomplete recrystallization is possible,*
- *hot forming – full recrystallization processes take place.*

Depending on the type of stock material, the following processes are distinguished:

- *bulk forming (stock materials: ingots, rods),*
- *sheet forming (stock materials: sheets, tapes).*

Depending on the shape (geometry) of the stock material, the tool type, and the method of drive transmission to tools, as well as on the transfer of force and energy to the stock material subject to forming, the following are distinguished:

- *open-die forging,*
- *closed-die forging,*
- *extrusion,*
- *rolling,*

- ciągnięcie,
- tłoczenie.

Niektóre z wymienionych procesów z założenia spełniają warunki charakterystyczne dla narastających procesów obróbki plastycznej metali [12]. Dla pozostałych procesów możliwe jest ich spełnienie po modyfikacji konstrukcji urządzeń i kinetyki pracy narzędzi kształtujących.

Do powszechnie stosowanych procesów narastającego kształtowania plastycznego należą: kucie swobodne (maszynowe i ręczne), kucie na kowarkach, kształtowanie obwiedniowe na pracach z wahającą matrycą lub prasie Wagnera, walcowanie pierścieni, obręczy i tulei rurowych, walcowanie prętów i rur o zmiennym na długości przekroju, wyoblanie i zginięcie obrotowe.

3. INNOWACYJNE PROCESY KSZTAŁTOWANIA NARASTAJĄCEGO

Procesy technologiczne można uznać za innowacyjne, jeżeli wnoszą do aktualnego stanu techniki elementy nowości w zakresie sposobów wytwarzania, rodzaju wyrobu, właściwości użytkowych wyrobu lub systemu i organizacji produkcji. W przypadku procesów kształtowania narastającego zasadniczymi elementami nowości są: sposób wytwarzania oraz właściwości użytkowe wyrobów. Efekty te są uzyskane poprzez wprowadzenie dodatkowych możliwości sterowania historią odkształcenia plastycznego [12–30].

Na obecnym etapie rozwoju procesów narastającego kształtowania plastycznego do innowacyjnych można zaliczyć: wyciskanie współbieżne i promieniowe KOBO, cykliczne wyciskanie spęczające, wyciskanie przez kanał kątowy, kucie wspomagane działaniem dodatkowych, cyklicznych naprężeń ścinających (stycznych), walcowanie z wymuszoną drogą odkształcenia, kształtowanie segmentowe.

Najbardziej zaawansowane są badania i próby przemysłowego stosowania **procesów wyciskania KOBO** [13, 14]. Rozróżnia się dwie odmiany tej metody wyciskania: bardziej znaną i stosowaną już na skalę przemysłową metodę wyciskania współbieżnego (rys.1) i stosunkowo

- drawing,
- press forming.

Some of the processes listed above fulfill characteristic conditions for incremental metal-forming processes, in principle [12]. These conditions can be fulfilled in other processes after modification of equipment designs and the kinetics of dies.

The widely used incremental metal forming processes include: open die forging (machine and manual), forging on swaging machines, generation on Marciniak orbital forming press or Wagner press, rolling of rings, bands, and pipe sleeves, rolling of rods and pipes with variable cross-section over length, spinning, and rotary extrusion.

3. INNOVATIVE INCREMENTAL FORMING PROCESSES

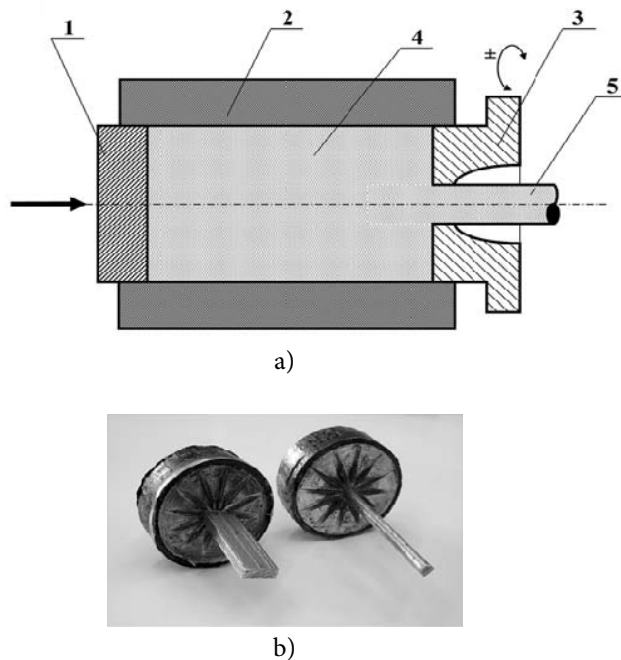
Technological processes can be considered to be innovative, if they introduce novelties in the scope of manufacturing methods, product type, functional properties of the product or system, and organization of production into the current state of technology. In the case of incremental forming processes, the essential components of novelty are: the method of manufacturing and functional product properties. These effects are achieved through the introduction of additional capabilities of controlling the history of plastic deformation [12–30].

At the current stage of development of incremental plastic working processes, the following can be considered to be innovative: coextrusion and KOBO radial extrusion, cyclic extrusion compression, equal angular channel pressing, forging supported by the action of additional, cyclic shear (tangential) stresses, rolling with forced deformation path, forming in segments.

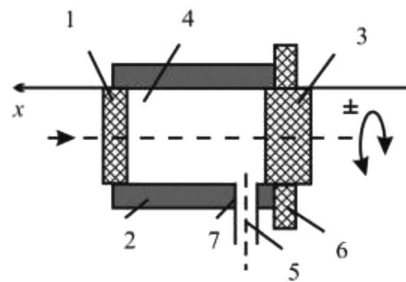
*Tests and trials of industrial application of **KOBO extrusion processes** [13, 14] are the most advanced. Two variations of this method are distinguished: the more well-known coextrusion (direct extrusion) method, which is already being applied on an industrial scale (Fig. 1), and the re-*

niedawno wprowadzoną modyfikację tej metody polegającą na wyciskaniu promieniowym (rys. 2). W obydwu metodach istotą procesu jest wprowadzenie dodatkowego odkształcenia, poprzez cykliczne skręcanie materiału przed jego wypłynięciem przez otwór matrycy. Taki sposób odkształcania daje duże możliwości wpływania na drogę odkształcenia i wielkość końcowego odkształcenia skumulowanego. Parametrami procesu, które pozwalają na sterowanie przebiegiem odkształcenia i wielkością całkowitego odkształcenia skumulowanego są: prędkość wyciskania, stosunek pola powierzchni przekroju materiału wsadowego do pola powierzchni przekroju materiału wyciskanego oraz częstotliwość i amplituda kąta skręcania oscylacyjnego materiału w strefie przejścia do otworu (lub otworów) matrycy. Nadzwyczaj korzystną cechą tych procesów jest stan naprężenia materiału znajdującego się w pojemniku i w strefie przejścia do otworów matrycy, który pozwala na stabilne prowadzenie procesu wyciskania oraz uzyskiwanie bardzo dużych odkształceń plastycznych nawet dla materiałów uznawanych w normalnych warunkach kształtowania plastycznego za „kruche”.

lately recently introduced modification of this method based on radial extrusion (Fig. 2). In both methods, the essence of the process is to introduce additional deformation through cyclic torsion of the material before it flows out through the opening of the die. Such a method of deformation gives great capabilities of influencing the deformation path and the degree of ultimate, cumulative deformation. The parameters of the process that allow for control of the course of deformation and degree of total, cumulative deformation are: extrusion rate, ratio of the surface area of the feedstock's cross-section to the surface area of the extruded material's cross-section, and the frequency and amplitude of the angle of oscillating torsion of the material in the zone of passage into the die's opening (or openings). An extraordinarily beneficial feature of these processes is a stress state of the material found in the container, and in the zone of passage into die openings, that allows for stable performance of the extrusion process and for obtaining very high plastic deformations, even for materials considered to be "brittle" under normal plastic forming conditions.



Rys. 1. Schemat wyciskania współbieżnego metodą KOBO (a): 1 – stempel, 2 – pojemnik, 3 – oscylacyjnie skręcana matryca, 4 – wyciskany materiał, 5 – wyciśnięty materiał, elementy wyciśnięte ze stopką (b): z prawej pręt płaski i z lewej pręt okrągły
 Fig. 1. Scheme of direct extrusion of metal by the KOBO method (a): 1 – punch, 2 – container, 3 – reversibly rotating die, 4 – extruded metal/billet, 5 – product), and pieces of products of aluminium with butts (b): wire – right sample, and tape – left sample)

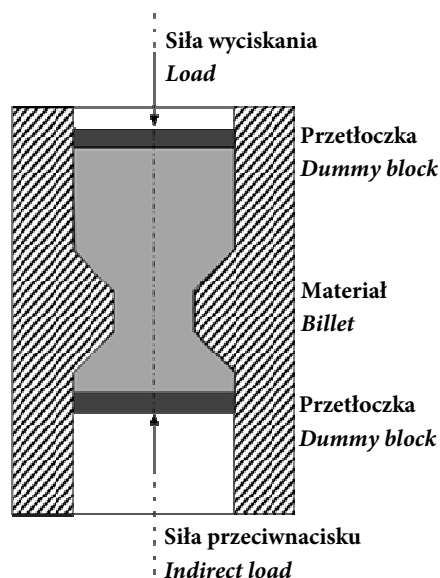


Rys. 2. Schemat wyciskania promieniowego metodą KOBO (z lewej) i wyciśnięty wyrób razem ze stopką (z prawej): 1 – stempel, 2 – pojemnik (recipient), 3 – cyklicznie skręcana nawrotnie uźebrowana tarcza, 4 – wyciskany materiał, 5 – wyciśnięty wyrób, 6 – zamek, 7 – otwór matrycy

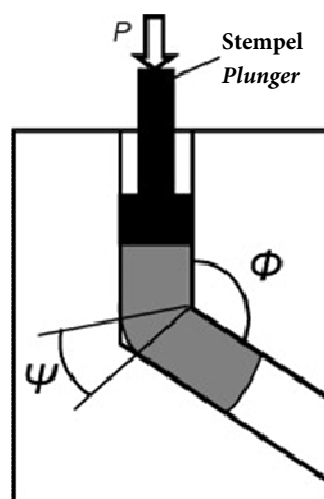
Fig. 2. Scheme of KoBo lateral extrusion and photograph of the process product: 1 – punch, 2 – container, 3 – reversibly rotating mandrel with ragging on front surface, 4 – extruded metal/billet, 5 – product, 6 – lock, 7 – die located on container's side surface

Cykliczne wyciskanie spęczające [15] jest oryginalnym sposobem uzyskiwania dużych, skumulowanych odkształceń plastycznych dla ograniczonej, objętością pojemników (recypientów), ilości materiału (rys. 3). Odkształcenie jest realizowane poprzez nawrotne wyciskanie materiału przez otwór matrycy, połączone z wywieraniem przeciwnacisku przez stempel znajdujący się po stronie wypływającego z matrycy materiału. Poprzez regulację siły przeciwnacisku możliwe jest wpływanie na przebieg drogi odkształcenia oraz stan naprężenia w odkształcanym materiale. Najbardziej korzystny jest stan obciążenia, który zapewnia całkowite wypełnienie przestrzeni narzędziowej za zwężką matrycową w poszczególnych cyklach wyciskania oraz występowanie warunków tarcia hydrodynamicznego [15]. Wielkość odkształcenia w jednym przejściu zależy od stosunku pola powierzchni materiału wsadowego do minimalnego pola powierzchni i cech geometrycznych zwężki, a wielkość całkowita skumulowanego odkształcenia plastycznego od liczby cykli przeciskania. W procesie tym ograniczony jest wpływ na końcowy kształt wyrobu i należy go traktować jako sposób nadawania materiałom dużych odkształceń. Parametrami procesu pozwalającymi wpływać na drogę odkształcenia i wielkość odkształceń skumulowanych są cechy geometryczne zwężki, wielkość przeciwnacisku i liczba cykli przeciskania.

Cyclic extrusion compression [15] is an original method of obtaining large, cumulative plastic deformations for containers (receptacles) of limited size, a limited quantity of material (Fig. 3). Deformation is realized through reverse material extrusion through the die opening, combined with the action of counter-pressure applied by a punch found on the side of the material flowing out of the die. By adjusting the force of counter-pressure, it is possible to influence the course of the deformation path and the stress state in the material subject to deformation. The most favorable load state is one that ensures complete filling of the tool space after the die orifice in individual extrusion cycles as well as the occurrence of hydrodynamic friction conditions [15]. The magnitude of deformation in one pass depends on the ratio of the surface area of the feedstock to the minimum cross-section and geometrical features of the orifice, and the total, cumulative degree of plastic deformation depends on the number of extrusion compression cycles. In this process, the impact on the final shape of the product is limited, and the process itself should be treated as a method for endowing a material with high deformations. The process parameters that make it possible to influence the deformation path and the magnitude of cumulative deformation are the geometrical features of the orifice, the value of counter-pressure force, and the number of extrusion compression cycles.



Rys. 3. Cykliczne wyciskanie spęczające
Fig. 3. Cyclic extrusion compression



Rys. 4. Wyciskanie kątowe: P – siła wyciskania, Φ – kąt nachylenia kanałów, ψ – kat zagięcia

Fig. 4. Equal angular channel pressing: P – force, Φ – angle of inclination of the channels, ψ – bending angle

Wyciskanie przez kanał kątowy (rys. 4) jest bardzo rozpowszechnionym sposobem uzyskiwania dużych skumulowanych odkształceń plastycznych. Proces ten stosowany jest już od dawna jednak ciągle trwają próby jego modyfikowania i dostosowywania do warunków przemysłowych. Istotą tego procesu jest wykorzystanie efektu występowania dużych odkształceń plastycznych w obszarze zmiany kierunku płynięcia materiału. Niestety niekorzystnym efektem, jaki występuje w obszarze kąтового fragmentu kanału, jest niejednorodne odkształcenie, którego intensywność jest zmniejszana poprzez skręcenie o kąt 180° wyciśniętego materiału przed podaniem do kolejnego wyciskania. Podstawowymi parametrami procesu, poprzez dobór których można wpływać na drogę odkształcenia i wielkość skumulowanego odkształcenia są: stosunek pola powierzchni kanału wejściowego do pola powierzchni kanału wyjściowego, cechy geometryczne kanałów, kąt nachylenia osi kanałów i promień zaokrąglenia w strefie zmiany kierunku płynięcia wyciskanego materiału.

Kucie matrycowe wspomagane działaniem dodatkowych, cyklicznych naprężeń stycznych polega na spęczaniu z równoczesnym wspomagającym oddziaływaniem naprężeń stycznych. Pro-

Equal angular channel pressing (Fig. 4) is a very widespread method of achieving high accumulated strain. This process has been used for many years, however attempts are still being made to modify it and adapt it to industrial conditions. The essence of this process is utilization of the effect of the presence of high strain in the area where the direction of material flow changes. Unfortunately, an unfavorable effect that takes place in the angular area of the channel is non-uniform deformation, the intensity of which is reduced through torsion of the extruded material by an angle of 180° before the next extrusion. The basic process parameters that can be adjusted to influence the deformation path and the magnitude of accumulated strain are: ratio of the surface area of the input channel to the surface area of the output channel, the geometrical features of channels, the angle of inclination of channel axes, and the fillet radius in the area where the flow of the extruded material changes direction.

Die forging supported by the action of additional, cyclic tangential shear stresses is based on upset forging with the simultaneous supporting action of tangential stresses. This process

ces może być prowadzony w dwóch różnych sekwencjach kształtowania [16, 17].

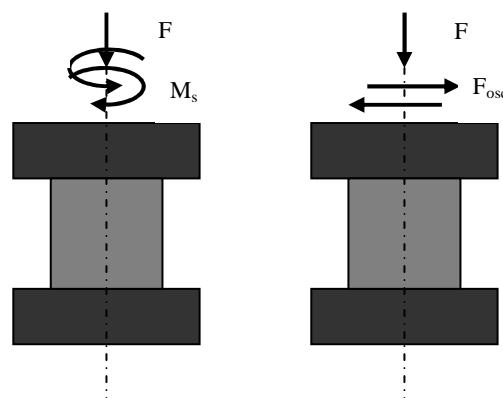
1. Kucie realizowane w dwóch etapach: kucie wstępne – polegające na spęczaniu z równoczesnym wspomagającym oddziaływaniem naprężeń ścinających, a następnie dokuwanie sposobem klasycznym, dla uzyskania wymaganego kształtu i wymiarów (w wykroju wykańczającym).
2. Kucie jednoetapowe polegające na spęczaniu z równoczesnym wspomagającym oddziaływaniem naprężeń ścinających do momentu bezpośrednio poprzedzającego uzyskanie wymaganego kształtu i wymiarów.

Zależnie od sposobu przyłożenia obciążenia, wywołującego działanie dodatkowych, wspomagających naprężeń ścinających, kształt odkuwek w płaszczyźnie podziałowej może być zbliżony do zarysu kołowego lub do prostokątnego. Jeżeli przyrząd pozwala na prowadzenie spęczania połączonego z cyklicznym skręcaniem (rys. 5a) – to możliwe jest kucie odkuwek o zarysie zbliżonym do kołowego. W przyrządzie pozwalającym na spęczanie z równoczesnym cyklicznym odkształcaniem poprzecznym (prostopadłym do kierunku nacisku prasy, rys. 5b, rys. 6) – możliwe jest kucie odkuwek o zarysie zbliżonym do prostokątnego.

may be conducted in two different forming sequences [16, 17].

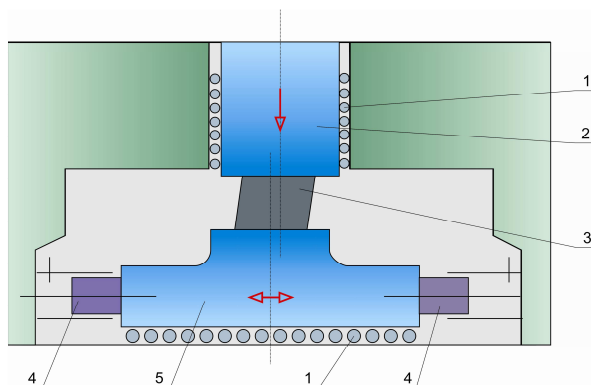
1. Forging is realized in two stages: preliminary forging – based on simultaneous upset forging supported by the action of shear stresses, followed by additional forging using the classical method in order to achieve the desired shape and dimensions (in a finishing impression).
2. Single-stage forging is based on simultaneous upset forging supported by the action of shear stresses until the instant directly preceding the achievement of the desired shape and dimensions.

Depending on the method of application of the load inducing the action of additional, supporting shear stresses, the shape of forgings in the neutral plane may be similar to a circular or rectangular outline. If the equipment allows for the execution of upset forging combined with cyclic torsion (Fig. 5a) – it is possible to produce forgings with an outline similar to that of a circle. In equipment enabling upset forging with simultaneous cyclic transverse deformation (perpendicular to the pressing direction, Fig. 5b, Fig. 6) – it is possible to produce forgings with an outline similar to that of a rectangle.



Rys. 5. Schemat obciążania materiału odkształcanego w procesach kształtowania plastycznego wspomaganych działaniem dodatkowych naprężeń stycznych: a) ściskanie z równoczesnym cyklicznym skręcaniem, b) ściskanie z równoczesnym obciążeniem cyklicznie zmienną siłą działającą w kierunku prostopadłym do kierunku nacisku siły ściskającej

Fig. 5. Loading scheme in plastic forming processes supported additional shear stress action: a) the simultaneous cyclical compression and torsion, b) the simultaneous compression and cyclical load the force in the direction perpendicular to the pressing direction of the compression force



Rys. 6. Schemat przyrządu do kształtowania wspomaganego naprężeniami ścinającymi poprzez cykliczny ruch nawrotny w kierunku poprzecznym do kierunku nacisku stempła: 1 – prowadnica z łożyskiem rolkowym, 2 – stempel przekazujący nacisk od prasy, 3 – odkształcany materiał (próbka), 4 – siłowniki hydrauliczne, 5 – kowadło o ruchu poprzecznym do kierunku nacisku na materiał odkształcany

Fig. 6. A device for forging aided by shear stress: 1 – float guides, 2 – upper punch, 3 – workpiece (sample), 4 – hydraulic cylinders, 5 – lower punch

Typowymi odkuwkami o zarysie kołowym (rys. 7) mogą być: odkuwka koła zębatego lub koła napędowego dla różnych napędów (pasowego, łańcuchowego, gąsienicowego itp.). Szczególnie korzystną cechą kół wykonanych tym sposobem jest bardzo duże odkształcenie plastyczne w strefie wieńca koła, czyli w strefie przenoszącej największe obciążenie. Ważną zaletą tego sposobu kształtowania jest również znacznie mniejszy nacisk prasowania (do 50% niższy).

The following are typical forgings with a circular outline (Fig. 7): a gear wheel or drive wheel forging for various drives (belt, chain, tread, etc.). A particularly favorable quality of wheels manufactured using this method is that the plastic deformation in the area of the wheel's rim, which is the zone carrying the highest load, is very high. A significantly lower pressing force (up to 50% lower) is another important advantage of this forming method.

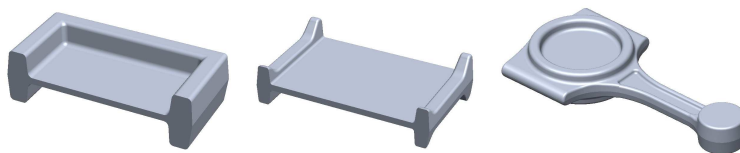


Rys. 7 Typowe odkuwki o zarysie zbliżonym do kołowego

Fig. 7. Typical forging of close to circular outline

Typowymi odkuwkami o zarysie zbliżonym do prostokątnego (rys. 8) są płyty z występami, korbowody i łączniki.

Typical forgings with an outline similar to that of a rectangle (Fig. 8) are plates with joggles (protrusions), connecting rods, and coupling links.



Rys. 8 Typowe odkuwki o zarysie prostokątnym

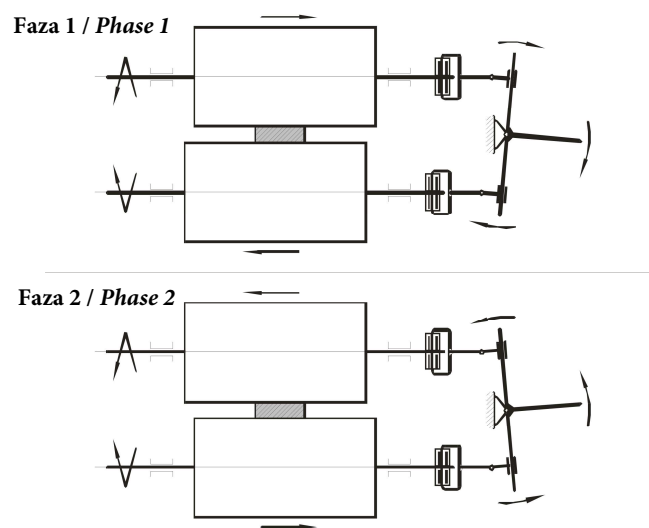
Fig. 8. Typical forging of rectangular outline

W **procesie walcowania z wymuszoną drogą odkształcenia** [18–21], efekt zmiany drogi odkształcenia jest wywołany przez wprowadzenie

In the process of rolling with forced strain path [18–21], the effect of a change of the strain path is brought about by the introduction of ad-

nie dodatkowego, cyklicznego ruchu poosiowego walców roboczych. 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. Przeniesienie ruchu poosiowego walców na materiał powoduje dodatkowe odkształcenie walcowanego materiału, którego wielkość zależy od amplitudy przemieszczenia i liczby przemieszczeń przekazywanych na materiał w trakcie jego przejścia przez kotlinę walcowniczą. Maksymalna wielkość wychylenia poosiowego walców wynosi ± 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. Schemat kinematyczny mechanizmu pozwalającego na cykliczny, poosiowy ruch walców w trakcie walcowania przedstawiono na rys. 9.

ditional, cyclic, axial motion of working rolls. During rolling, working rolls can move axially in opposite directions. In order to transfer the transverse motion of rolls to the material subject to deformation, circumferential grooves are found on roll barrels. The transfer of the rolls' axial motion to the material causes additional deformation of the material subject to rolling, the magnitude of which depends on the amplitude of displacement and the number of displacements transferred to the material over the course of its passage through the roll gap. The maximum value of roll axial deflection amounts to ± 2 mm, which enables the achievement of a displacement amplitude of 8 mm. The frequency of axial roll motion can be adjusted within the range from 0 to 3 Hz, similarly to roll rotational speed, adjusted within the range from 0 to 20 rpm. The kinematic scheme of the mechanisms allows for cyclic, axial roll motion during rolling and has been presented in Fig. 9.



Rys. 9. Schemat kinematyczny walcarki z cyklicznym, poosiowym ruchem walców [4]

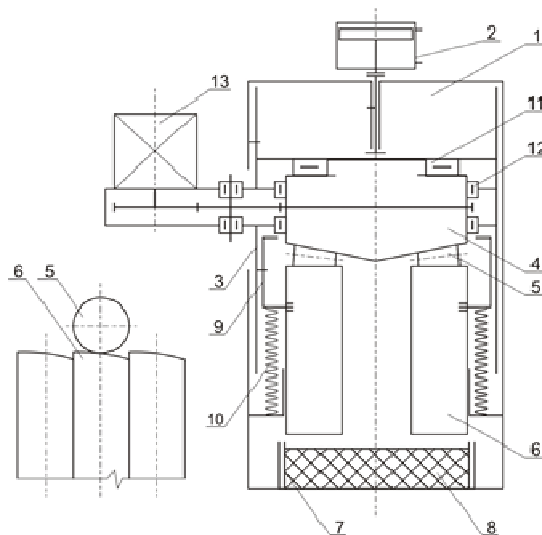
Fig. 9. Kinematic scheme of rolling mill with cyclic, transverse rolls movement [4]

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

The segmental forming process is based on making recesses of large surfaces and depths by summing the recesses of individual segments with small pressure surfaces and a single small recess. A special device has been designed in order to implement such a method of deformation [8, 9]. The device's hallmark is the design

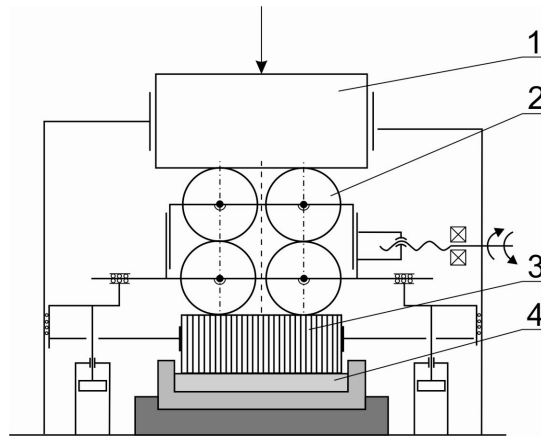
przyrządu jest konstrukcja stempla górnego, który składa się z szeregu skojarzonych ze sobą segmentów (rys. 10). Ruch roboczy segmentów stempla, wywołujący odkształcanie materiału, odbywa się poprzez oddziaływanie rolek, osadzonych w gniazdach, na górną oporową powierzchnię segmentów. Odkształcenie może być realizowane jednocześnie przez taką samą liczbę segmentów, jak liczba rolek. Przykładowo, zastosowanie trzech rolek wywołuje jednoczesne wgłębianie trzech segmentów. Pozostałe segmenty nie uczestniczą w danej chwili w odkształcaniu. 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 odkształcenia zapewnia istotne obniżenie siły kształtowania.

of the upper punch, which consists of a series of coupled segments (Fig. 10). The working motion of the punch's segments, causing deformation of the material, takes place through the interaction of rolls, mounted in sockets, with the top, resisting surface of segments. Deformation can be realized simultaneously by a number of segments equal to the number of rolls. For example, the application of three rolls causes the simultaneous indentation of three segments. Other segments are not involved in deformation at the time. The number of the punch's segments is a multiple of the number of rolls, for example: 6, 9, 12 segments are expected in a 3-roll configuration. The segmented design of the punch and the kinematics of motion bring about local flow of the material. Plasticized zones appear sequentially in the material, in a number equal to the number of applied rolls and with a frequency depending on the rotational speed of the holder in which rolls are mounted. Such a method of conducting deformation provides a significant reduction of forming force.



Rys. 10. 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. 10. 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



Rys. 11. Schemat przyrządu do kształtowania segmentowego z rolkami naciskającymi przemieszczanymi liniowym ruchem posuwisto zwrotnym: 1 – stempel przekazujący nacisk na rolki, 2 – przemieszczane rolki naciskające na wgłębiane segmenty, 3 – segmenty naciskające na odkształcany materiał, 4 – odkształcany materiał

Fig. 11. Schematic of the device for incremental forming with segmented punches:
1 – pressure plate, 2 – working rolls, 3 – segmented punch, 4 – workpiece

Całkowity nacisk prasy jest przekazywany jedynie na fragment powierzchni odkształcanego materiału, tym samym uzyskujemy lokalnie duże wartości nacisków jednostkowych i możliwość uplastycznienia materiałów charakteryzujących się, w określonych warunkach procesu obróbki plastycznej, znacznym średnim naciskiem kształtowania. 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. Dla elementów o zarysie zbliżonym do prostokątnego, korzystniejsze jest zastosowanie przyrządu w którym ruch rolek jest posuwisto-zwrotny (rys. 11).

4. TECHNOLOGICZNA PLASTYCZNOŚĆ MATERIAŁÓW W PROCESACH KSZTAŁTOWANIA NARASTAJĄCEGO (NAPRĘŻENIE UPLASTYCZNIAJĄCE I ODKSZTAŁCENIE GRANICZNE)

Projektowanie oraz modelowanie i symulacja procesów kształtowania plastycznego wymagają dobrego opisu ilościowego funkcji nap-

The total force of the press is transferred to only a part of the surface of the deformed material, and thus, locally high unit pressure values and the capability of plasticizing materials characterized by, under specific conditions of the plastic working process, a significant average forming pressure are achieved. This also allows for effective forming of ring forgings, forgings in the form of disks, ribbed wheels characterized of a large face surface and an unfavorably low ratio of forging height to exterior diameter from the perspective of forming pressures. The high pressures occurring in traditional methods of forming forgings of this type cause overloading of machinery as well as the destruction of the working tools of punches and dies. In the case of parts with an outline similar to that of a rectangle, it is more favorable to apply equipment in which roll motion is reciprocating (Fig. 11).

4. FORMABILITY OF MATERIALS IN INCREMENTAL FORMING PROCESSES (FLOW STRESS AND STRAIN TO FRACTURE)

Designing, modeling, and simulation of metal forming processes require a good quantitative description of the functions of flow stress and strain

rężenia uplastyczniającego i odkształcenia granicznego. Funkcja naprężenia uplastyczniającego jest elementem równania konstytutywnego, które jest podstawą numerycznej symulacji komputerowej procesów kształtowania plastycznego. Od jakości tej funkcji, od dokładności uwzględnienia wpływu warunków odkształcania na wartość naprężenia uplastyczniającego zależy stopień zbliżenia uzyskanych wyników symulacji do wielkości występujących w procesach fizycznych. Dotyczy to wszystkich wielkości opisujących stany mechaniczne, cieplne, strukturalne i dynamiczne, zarówno opisujących stany występujące wewnątrz odkształcanego materiału, jak również występujące na powierzchni zewnętrznej swobodnej i powierzchni kontaktu z narzędziami kształtującymi. Aktualnie szeroko dostępne są jedynie funkcje opisujące wpływ warunków kształtowania dla procesów, w których przebieg lokalnych stanów odkształcenia jest zbliżony do monotonicznego i proporcjonalnego. Takie przebiegi stanów odkształcenia są charakterystyczne dla klasycznych procesów kształtowania objętościowego (walcowanie, kucie, wyciskanie, ciągnięcie). W innowacyjnych procesach narastającego kształtowania plastycznego przebieg lokalnych stanów odkształcenia jest niemonotoniczny, a bywa również nieproporcjonalny. Dla takich przebiegów stanu odkształcenia konieczne jest uwzględnienie w opisie funkcji naprężenia uplastyczniającego historii przebiegu odkształcenia plastycznego.

Ogólna zależność opisująca naprężenie uplastyczniające σ_p , czyli naprężenie niezbędne do zainicjowania i kontynuacji plastycznego płynięcia materiału, jest funkcją wielkości odkształcenia ε , prędkości odkształcenia $\dot{\varepsilon}$, temperatury T i historii przebiegu odkształcenia h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, h_\varepsilon) \quad (1)$$

W procesach przeróbki plastycznej na zimno pomija się oddziaływanie temperatury i prędkości odkształcenia i wówczas naprężenie uplastyczniające można wyrazić funkcją, w której zmiennymi niezależnymi są: wielkości odkształcenia ε i parametry opisujące historię przebiegu odkształcenia h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, h_\varepsilon) \quad (2)$$

to fracture. The flow stress function is a component of the constitutive equation that is the basis for numerical, computerized simulation of metal forming processes. The degree in which the results of simulation are similar to the quantities occurring in physical processes depend on the quality of this function and on the accuracy with which the influence of deformation conditions on the flow stress is accounted for. This pertains to all quantities describing mechanical, thermal, structural, and dynamic states, both those describing the states present inside of the material subject to deformation and those occurring on the free exterior surface and on the contact surface with forming tools. Functions describing the influence of forming conditions are currently only widely available for processes in which the progression of local deformation states is similar to a monotonic and proportional progression. Such progressions of deformation states are characteristic of classical bulk forming processes (rolling, forging, extrusion, drawing). In innovative incremental plastic forming processes, the progression of local deformation states is non-monotonic and is sometimes also disproportionate. For such progressions of the deformation state, it is necessary to account for the history of the progression of plastic deformation in the description of the plasticizing stress function.

The general relation describing flow stress σ_p which is the stress required to initiate and continue plastic material flow, is a function of strain ε , strain rate $\dot{\varepsilon}$, temperature T , and the deformation history h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, h_\varepsilon) \quad (1)$$

In cold forming processes, the influence of temperature and strain rate are omitted, and flow stress can then be expressed as a function in which the independent variables are: strain ε and parameters describing the deformation history h_ε :

$$\sigma_p = \sigma_p(\varepsilon, h_\varepsilon) \quad (2)$$

Parametrami opisującymi historię odkształcenia są: wielkość pojedynczego odkształcenia (ε_{poj}), czasy przerw pomiędzy kolejnymi odkształceniami (t_{pp}) i droga odkształcenia, określona przebiegiem wartości składowych odkształceń w funkcji czasu.

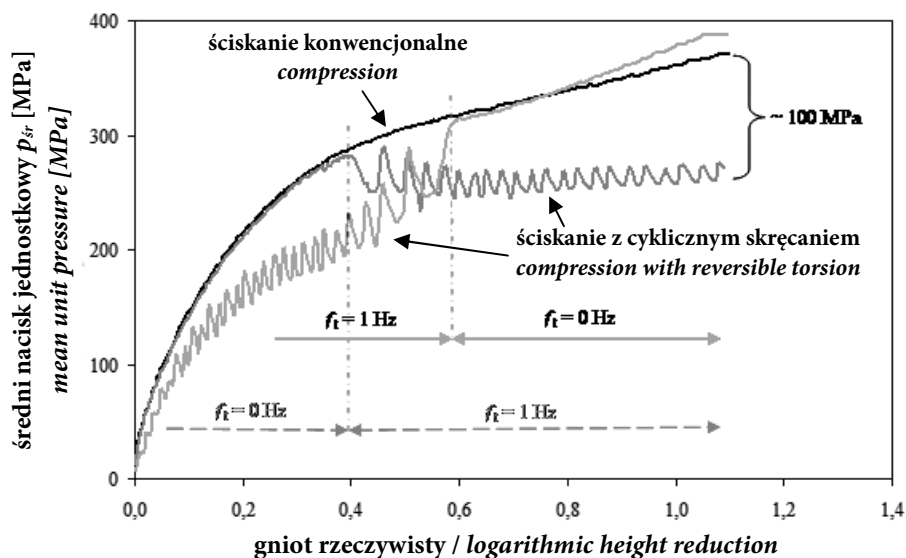
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1(t), \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2(t), \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_3(t) \quad (3)$$

Wyniki badań uzyskane dla próby ściskania z równoczesnym cyklicznym skręcaniem [1–4], wykazały istotnie różniące się przebiegi średnich nacisków jednostkowych od przebiegów uzyskanych dla proporcjonalnego i monotonicznego przebiegu składowych stanu odkształcenia (rys.12).

The parameters describing deformation history are: an individual strain (ε_{poj}), break times between successive deformations (t_{pp}), and the strain path, determined as the progression of principal strain components in a function of time.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1(t), \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2(t), \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_3(t) \quad (3)$$

The results obtained from compression tests with simultaneous cyclic torsion [1–4] showed that the progressions of average unit pressures differed significantly from the progressions obtained for a proportional and monotonic progression of deformation state components (Fig. 12).



Rys. 12. Wpływ drogi odkształcenia na wielkość średniego nacisku jednostkowego [4]

Fig. 12. Influence of the variation of deformation path on the value of mean pressure p_m [4]

Również efekty strukturalne, uzyskane w wyniku takiego przebiegu odkształcenia, różniły się od tych, które występują w procesach o monotonicznym i proporcjonalnym przebiegu odkształceń.

Przeprowadzone w pracy [5] badania wpływu historii przebiegu odkształcenia plastycznego na naprężenie uplastyczniające, w zróżnicowanych warunkach obciążenia, wykazały występowanie wielu efektów siłowych, których znajomość i praktyczne wykorzystanie w procesach kształtowania plastycznego może być podstawą do rozwoju nowych, innowacyjnych procesów obróbki plastycznej. Wyniki badań pozwoliły wyznaczyć zależności pomiędzy naprężeniem uplas-

Structural effects, obtained as a result of such a progression of deformation, also differed from those that occur in processes with a monotonic and proportional progression of deformations.

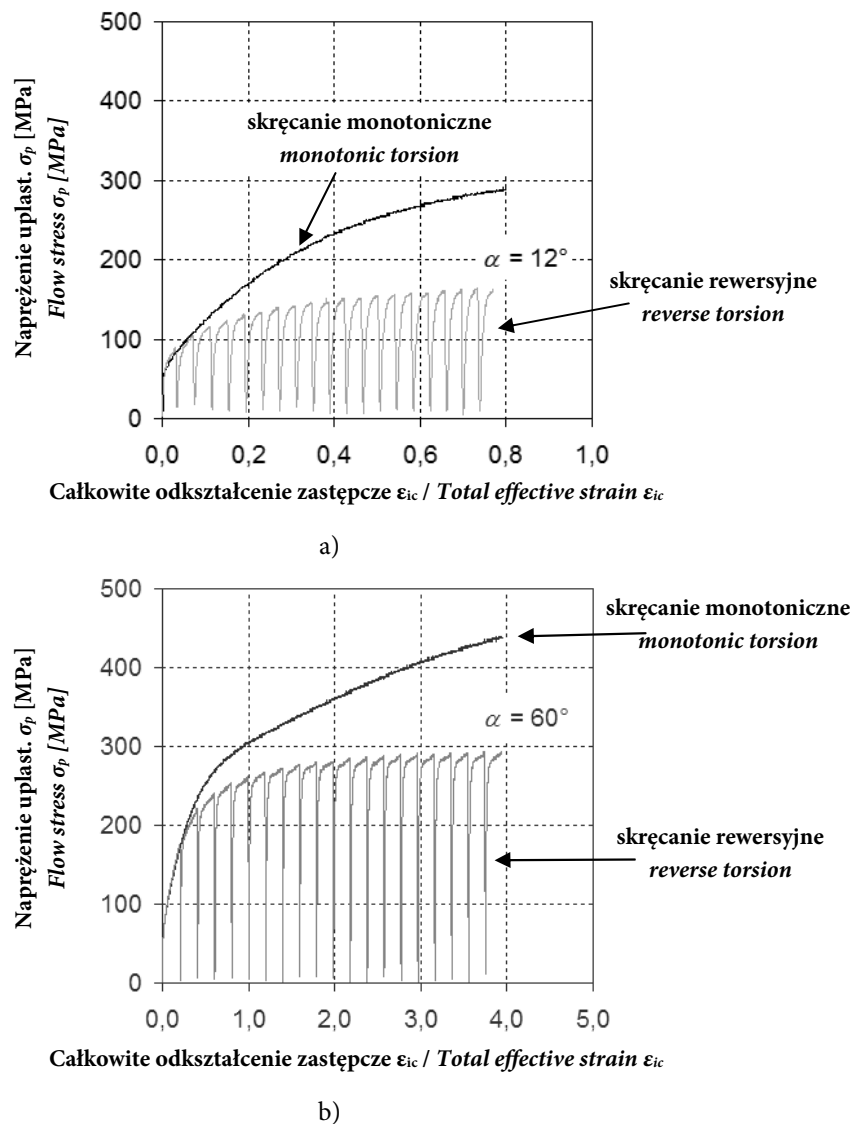
Studies of the influence of the history of plastic deformation progression on flow stress conducted in work [5], under varying load conditions, proved the occurrence of many force effects, the knowledge and practical application of which, in plastic forming processes, may be the foundation for developing new, innovative plastic working processes. Test results made it possible to determine dependences between flow stress and strain while accounting for the history

tyczniającym i odkształceniem z uwzględnieniem historii przebiegu odkształcenia opisaną: wielkością pojedynczego odkształcenia ε_{poj} , zmianą orientacji osi głównych $\alpha\varepsilon$ oraz wartościami składowych odkształceń głównych $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, w kolejnych, pojedynczych odkształceniach, liczbą pojedynczych odkształceń l_{poj} , jak również wielkością odkształcenia całkowitego ε_{ic} .

Wyniki badań wskazują, że niezależnie od rodzaju materiału oraz kąta skręcania poziom naprężenia uplastyczniającego, w warunkach skręcania rewersyjnego, jest znacznie niższy od wartości naprężenia uplastyczniającego w warunkach monotonicznych (rys. 13).

of deformation progression, described by: the degree of a single deformation ε_{poj} , the change in the orientation of principal axes $\alpha\varepsilon$, the values of principal component deformations $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, in individual, successive deformations, the number of single deformations l_{poj} , as well as the degree of total deformation ε_{ic} .

The results of studies indicate that, regardless of the type of material and angle of torsion, the value of flow stress under reverse torsion conditions is significantly lower than the value of flow stress under monotonic conditions (Fig. 13).



Rys. 13. Naprężenie uplastyczniające w zależności od całkowitego odkształcenia zastępczego $\sigma_p = f(\varepsilon_{ic})$ w warunkach skręcania rewersyjnego i monotonicznego próbek pełnych z miedzi; kąt skręcania: a. $\alpha = 12^\circ$, b. $\alpha = 60^\circ$

Fig. 13. Flow curves of solid copper samples subjected to reversible and monotonic torsion; torsion angle: a. $\alpha = 12^\circ$; b. $\alpha = 60^\circ$

Tab. 1. Współczynniki umocnienia C i wskaźniki umocnienia n funkcji potęgowych
 Tab. 1. Strain-hardening coefficients C and hardening indices n of exponential functions

	Zastępcze odkształcenie pojedyncze ε_{ipoj} Individual effective strain ε_{ipoj}		
Parametry funkcji potęgowej $\sigma_p = C\varepsilon_{ic}^n$ Parameters of exponent-tial function $\sigma_p = C\varepsilon_{ic}^n$	0,043	0,086	0,215
Współczynnik umocnienia C Strain-hardening coefficient C	179	232	252
Wskaźnik umocnienia n Hardening index n	0,20	0,23	0,17

Przebieg zmiany naprężenia uplastyczniającego w pojedynczym odkształceniu jest potęgowa. Jeżeli odkształcanie ma charakter cyklicznie zmienny, to ze względów praktycznych istotny jest przebieg zmian wartości maksymalnych naprężeń uplastyczniających, występujących w kolejnych, pojedynczych odkształceniach.

Przebiegi maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego, w cyklu rewersyjnego skręcania, można przedstawić w postaci zależności dwóch funkcji. W początkowej fazie odkształcania, charakteryzującej się intensywnym wzrostem naprężenia uplastyczniającego, określono funkcją potęgowa, a zakres ustalonego poziomu naprężenia uplastyczniającego wartością stałą. Zakładając, że współczynnik umocnienia C i wykładnik umocnienia n są określone funkcyjną zależnością od pojedynczego odkształcenia zastępczego ($C = f(\varepsilon_{ipoj})$, $n = f(\varepsilon_{ipoj})$), to ogólną postać modelu naprężenia uplastyczniającego przedstawia zależność:

$$\sigma_{p \max} = f(\varepsilon_{ic}) = \begin{cases} \sigma_{p \max} = C(\varepsilon_{ipoj})\varepsilon_{ic}^{n(\varepsilon_{ipoj})} & \varepsilon_{ic} \in (0, \varepsilon_{icu}] \\ \sigma_{pu} = \sigma_{p \max}(\varepsilon_{icu}) & \varepsilon_{ic} \in [\varepsilon_{icu}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

gdzie ε_{icu} to wartość całkowitego odkształcenia zastępczego, odpowiadająca punktowi przecięcia funkcji potęgowej i stałej. Na wykresach punkty przecięcia funkcji przedstawiono za pomocą krzywej rozgraniczającej (rys. 14).

Osiągnięcie stanu ustalonego dla naprężenia uplastyczniającego σ_{pu} występuje we wszystkich sposobach odkształcania. Wartość i poziom naprężenia uplastyczniającego i wielkość odkształcenia rozgraniczającego zależą od sposobu odkształcania i wielkości odkształcenia pojedynczego ε_{ipoj} (rys. 14). Im mniejsza wartość odkształcenia pojedynczego, tym niższy jest poziom ustalonego naprężenia uplastyczniającego

The progression of the change of flow stress in a single deformation is described by an exponential function. If deformation is of a cyclically variable nature, then the progression of changes in the values of maximum flow stresses occurring in successive single deformations is important for practical reasons.

Progressions of maximum flow stress values in a reverse torsion cycle can be presented in the form of a dependence of two functions. In the initial deformation phase, characterized by intensive growth of flow stress, the exponential function was determined, and the range of the established flow stress value was determined as a constant value. Under the assumption that hardening coefficient C and hardening exponent n are defined by a function dependent on an individual effective strain ($C = f(\varepsilon_{ipoj})$, $n = f(\varepsilon_{ipoj})$), the general form of the plasticizing stress model is expressed as the dependency:

$$\sigma_{p \max} = f(\varepsilon_{ic}) = \begin{cases} \sigma_{p \max} = C(\varepsilon_{ipoj})\varepsilon_{ic}^{n(\varepsilon_{ipoj})} & \varepsilon_{ic} \in (0, \varepsilon_{icu}] \\ \sigma_{pu} = \sigma_{p \max}(\varepsilon_{icu}) & \varepsilon_{ic} \in [\varepsilon_{icu}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

where ε_{icu} is the value of total effective strain corresponding to the point of intersection of the exponential and constant function. On charts, the points of intersection of these functions have been presented by means of a separating curve (Fig. 14).

Achievement of the state determined for flow stress σ_{pu} occurs in all methods of deformation. The value and level of flow stress as well as the value of separating deformation are dependent on the method of deformation and the value of a single deformation ε_{ipoj} (Fig. 14). The lower the value of a single deformation, the lower the determined value of flow stress and the lower the

odkształcenia rozgraniczającego. Na rys. 14 przedstawiono krzywą rozgraniczającą zakresy odkształcenia dla maksymalnych naprężeń uplastyczniających narastających ε_{pmax} od zakresu odkształcenia, dla których naprężenie ma wartość ustaloną $\varepsilon_{pu} = \text{const}$, wyznaczoną dla zastępczych odkształceń pojedynczych $\varepsilon_{ipoj} = 0,043, 0,086$ i $0,215$. W tab. 1 zamieszczono wartości współczynników umocnienia C i wykładników umocnienia n funkcji potęgowych opisujących przebieg maksymalnych wartości naprężenia uplastyczniającego w początkowej fazie odkształcenia dla odpowiednich zastępczych odkształceń pojedynczych ε_{ipoj} .

Złożone warunki obciążenia realizowano przez jednoosiowe rozciąganie z równoczesnym rewersyjnym skręcaniem lub jednoosiowe ściskanie z równoczesnym rewersyjnym skręcaniem. Wskaźnik drogi odkształcenia s_ε , obliczany jest jako iloraz prędkości odkształcenia od skręcania $\dot{\varepsilon}_s$ do prędkości odkształcenia liniowego $\dot{\varepsilon}_l$ (rozciągania lub ściskania), zgodnie z równaniem:

$$s_\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_l} \quad (5)$$

Przyłożenie dodatkowych obciążeń wywołujących rozciąganie lub ściskanie powoduje wzrost wielkości naprężenia uplastyczniającego, w porównaniu z wartością uzyskaną dla rewersyjnego skręcania. Wzrost jest tym większy, im większy jest udział odkształcenia spowodowanego rozciąganiem lub ścisaniem w wielkości całkowitego odkształcenia materiału (rys. 15).

Odkształcanie w procesach złożonego obciążenia, rozciągania połączonego z rewersyjnym skręcaniem i ściskania połączonego z rewersyjnym skręcaniem jest mniej korzystne od prostego rewersyjnego skręcania. Wraz ze wzrostem udziału w odkształceniu całkowitym, wielkości odkształcenia wywołanego rozciąganiem lub ścisaniem, rośnie wielkość naprężenia uplastyczniającego i maleje odkształcenie graniczne.

Umiejętność prawidłowej identyfikacji tych parametrów, w badaniach podstawowych, jest szczególnie ważna w procesach modelowania numerycznego, opracowywania przebiegu procesów technologicznych przeróbki plastycznej i projektowania nowych urządzeń. Możliwość przewidywania i prognozowania przebiegu krzy-

value of a single deformation, the lower the determined value of flow stress and the lower the value of separating deformation. Fig. 14 presents a curve separating deformation ranges for maximum incremental flow stresses ε_{pmax} from the deformation ranges for which stress has a constant value $\varepsilon_{pu} = \text{const}$, determined for individual effective strains $\varepsilon_{ipoj} = 0.043, 0.086$ and 0.215 . Tab. 1 shows the values of hardening coefficients C and hardening exponents n of the exponential functions describing the progression of maximum flow stress values in the initial phase of deformation for the appropriate individual effective strains ε_{ipoj} .

Complex load conditions were implemented by means of uniaxial tension with simultaneous reverse torsion or uniaxial compression with simultaneous reverse torsion. The strain path index s_ε is calculated as the quotient of the torsional strain rate $\dot{\varepsilon}_s$ over the linear strain rate $\dot{\varepsilon}_l$ (tensile or compressive), according to the equation:

$$s_\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_l} \quad (5)$$

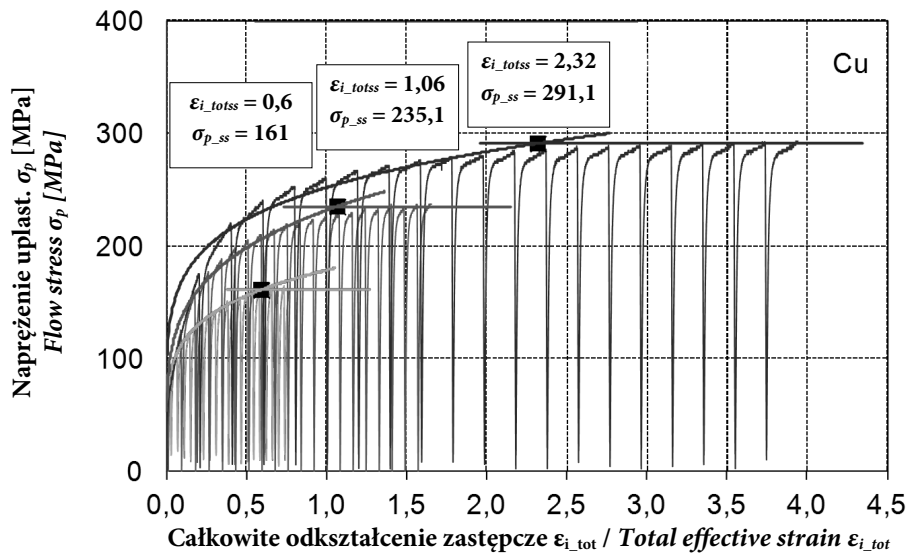
The application of additional loads causing tension or compression causes an increase in the value of flow stress compared to the value obtained for reverse torsion. The greater the share of strain caused by tension or compression in the total strain, the greater this increase is (Fig. 15).

Deformation in processes with complex loading, tension combined with reverse torsion, and compression combined with reverse torsion is less favorable than simple reverse torsion. As the share of strain caused by tension or compression in total strain increases, so too does the value of flow stress, while the strain to fracture decreases.

The ability to correctly identify these parameters in basic studies is particularly important in numerical modeling processes and in the development of technological processes involving metal forming and designing new equipment. The capability of predicting and forecasting the progression of flow stress curves, which account

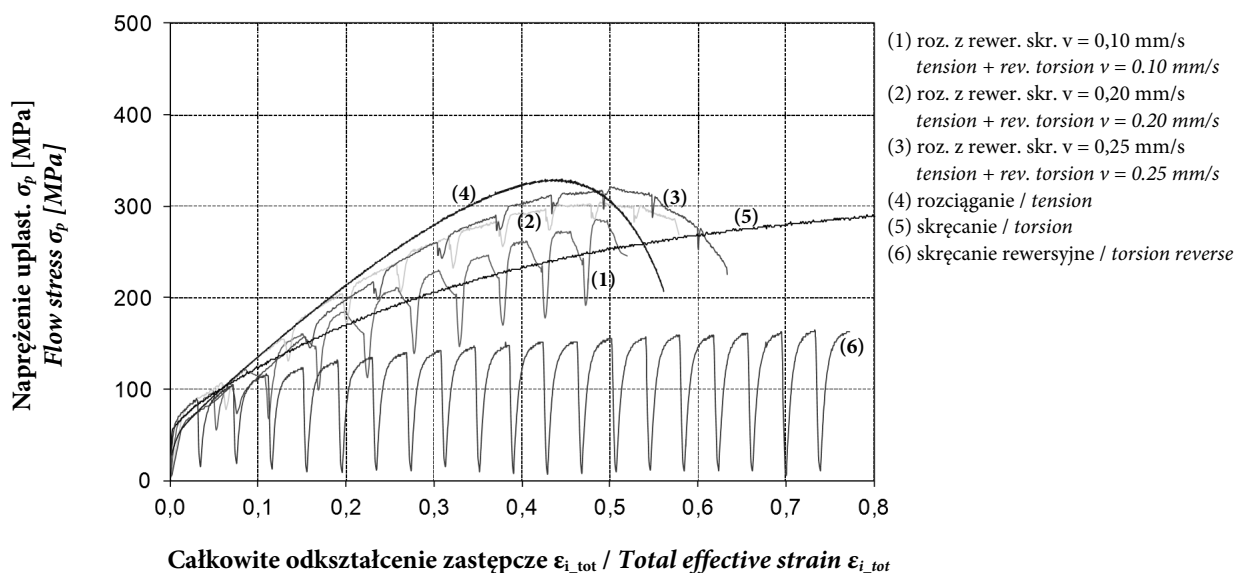
wych naprężenia uplastyczniającego, uwzględniających zmianę drogi odkształcenia, jest bardzo ważna dla rozwoju nowych technologii przeróbki plastycznej.

for changes in the strain path, is very important to the development of new metal forming technologies.

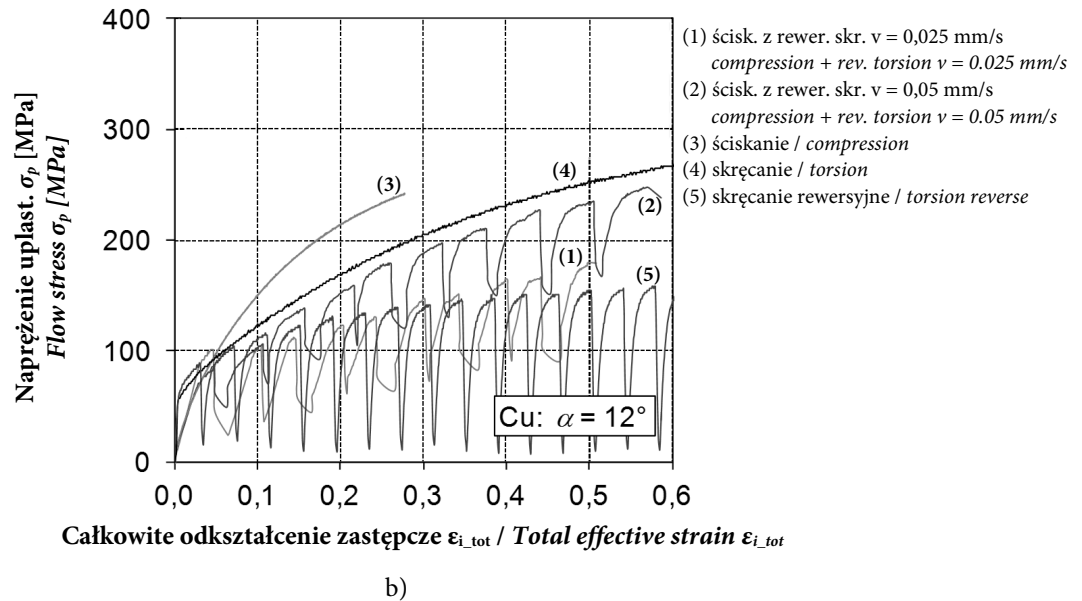


Rys. 14. Przebieg zmian naprężenia uplastyczniającego σ_p w próbach rewersyjnego skręcania próbki z miedzi w zależności od całkowitego odkształcenia zastępczego dla różnych odkształceń pojedynczych $\varepsilon_{i_{poj}} = 0,043, 0,086, 0,215$

Fig. 14. The effect of total equivalent strain on flow stress σ_p of a copper sample for various single equivalent strains $\varepsilon_{i_{poj}} = 0,043, 0,086, 0,215$



a)

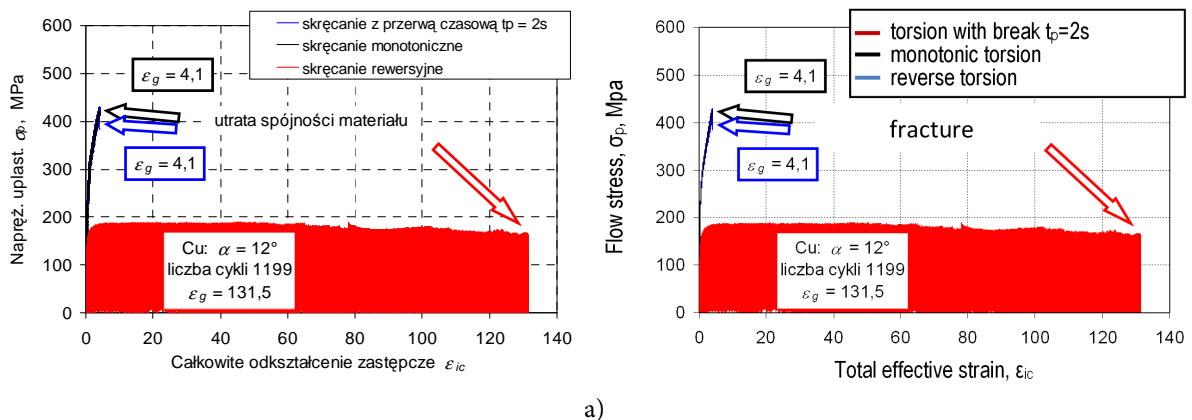


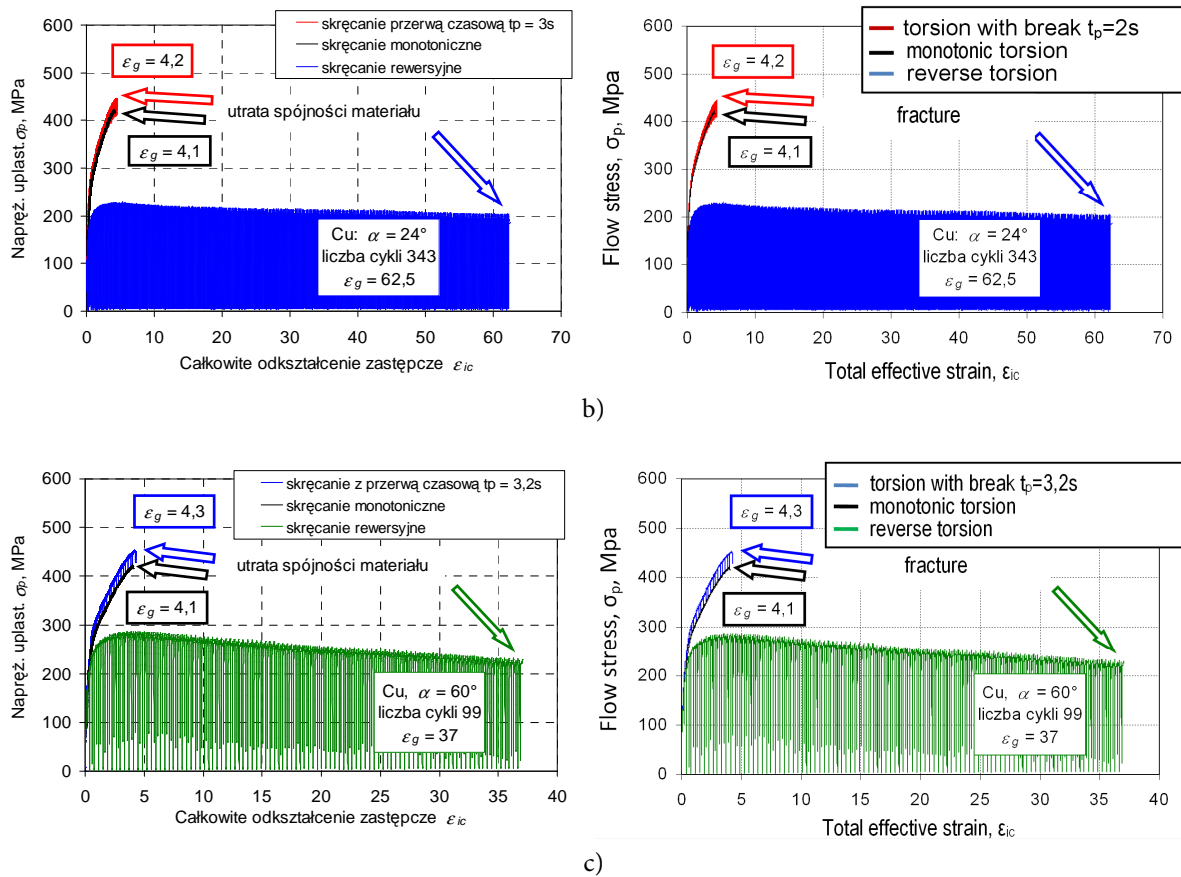
Rys. 15. Naprężenie uplastyczniające w złożonych próbach rozciągania (a) oraz ściskania (b) z rewersyjnym skręcaniem dla stałej wartości kąta skręcania $\alpha = 12^\circ$ w fazie i różnej prędkości rozciągania lub ściskania na tle charakterystyki rozciągania, ściskania, skręcania monotonicznego i skręcania rewersyjnego próbki z Cu

Fig. 15. Flow curves of Cu from tension with reversible torsion (a) and compression with reversible torsion (b) for constant torsion angle $\alpha = 12^\circ$ in one phase and various tension velocities compared to flow curves from tension, compression, monotonic torsion, reversible torsion of a copper sample

Odształcanie w warunkach złożonego obciążenia: rozciągania połączonego z rewersyjnym skręcaniem i ściskania połączonego z rewersyjnym skręcaniem, jest mniej korzystne od prostego rewersyjnego skręcania. Wraz ze wzrostem udziału w odkształceniu całkowitym, wielkości odkształcenia wywołanego rozciąganiem lub ściskaniem, rośnie wielkość naprężenia uplastyczniającego i maleje odkształcenie graniczne.

Deformation under complex load conditions: tension combined with reverse torsion, and compression combined with reverse torsion is less favorable than simple reverse torsion. As the share of strain caused by tension or compression in total strain increases, so too does the value of flow stress, while the strain to fracture decreases.





Rys. 16. Naprężenie uplastyczniające w warunkach rewersyjnego skręcania próbki z Cu do utraty spójności materiału na tle ciągłego skręcania monotonicznego i skręcania z przerwą czasową t_p ; kąt skręcania rewersyjnego: a. $\alpha = 12^\circ$, b. $\alpha = 24^\circ$, c. $\alpha = 60^\circ$

Fig. 16. Flow curves of Cu during reversible torsion, monotonic torsion and interrupted torsion until fracture; torsion angle: a. $\alpha = 12^\circ$; b. $\alpha = 24^\circ$; c. $\alpha = 60^\circ$

Ustalenie stopnia oddziaływania warunków odkształcania na wielkość odkształcenia granicznego ϵ_g zostało przeprowadzone w próbach skręcania rewersyjnego, przyjmując do określenia odkształcenia granicznego kryterium utraty spójności materiału. Próby prowadzono dla kątów skręcania rewersyjnego $\alpha = 12^\circ$, 24° i 60° , co odpowiada wartościom odkształcenia zastępczego ϵ_i odpowiednio: 0,04, 0,08 i 0,2. Wyniki tych prób porównano z wynikami uzyskanymi dla ciągłego skręcania monotonicznego i skręcania monotonicznego z przerwami czasowymi t_p , które odpowiadały czasom przerw pomiędzy kolejnymi skręczeniami w próbach rewersyjnego skręcania. Wykresy naprężenia uplastyczniającego wyznaczone w warunkach rewersyjnego skręcania porównano z wykresami ciągłego skręcania monotonicznego i skręcania z przerwami czasowymi (rys. 16). Charakterystyczne dla przebiegu tych prób jest uzyskanie wielokrotnie większego odkształcenia granicz-

Determination of the degree of influence of deformation conditions on the value of the elastic limit ϵ_g has been performed in reverse torsion trials, with acceptance of the criterion of loss of material cohesion for determination of the elastic limit. Tests were carried out for reverse torsion angles $\alpha = 12^\circ$, 24° and 60° , which corresponds to substitute deformation ϵ_i values of, respectively: 0,04, 0,08 and 0,2. The results of these tests were compared to results obtained for continuous monotonic torsion and monotonic torsion with breaks t_p , with times corresponding to break times between successive torsions in reverse torsion tests. Plasticizing stress curves determined under reverse torsion conditions were compared with charts of continuous monotonic torsion and torsion with breaks (Fig. 16). The fact that strain to fracture that was many times greater than the one obtained in the test with monotonic torsion progression was achieved in reverse torsion tests is characteristic of the pro-

nego w próbach skręcania rewersyjnego w porównaniu z monotonicznym przebiegiem skręcania. W próbie skręcania rewersyjnego miedzi dla $\alpha = 12^\circ$ uzyskano odkształcenie graniczne $\varepsilon_g = 131,5$ w 1199 cyklach skręcania (rys. 16 a). Dla pozostałych kątów skręcania $\alpha = 24^\circ$ i 60° uzyskane wartości odkształcenia granicznego wynosiły odpowiednio $\varepsilon_g = 62,5$ i 37 (rys. 16 b i c).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Rozkład i wielkość odkształceń lokalnych, uzyskiwanych w procesach narastającego kształtowania plastycznego, istotnie różnią się od odkształceń lokalnych występujących w klasycznych procesach obróbki plastycznej.
2. Innowacyjne procesy narastającego kształtowania plastycznego rozszerzają możliwości oddziaływania na wielkość i rozkład lokalnego odkształcenia, wielkość siły nacisku narzędzia na kształtowany materiał oraz jego strukturę.
3. Przedstawione w opracowaniu nowe, innowacyjne procesy narastającego kształtowania plastycznego otwierają nowe perspektywy dla procesów obróbki plastycznej metali.
4. Zasadniczymi zaletami innowacyjnych procesów narastającego kształtowania plastycznego są:
 - możliwość uzyskiwania dużych odkształceń plastycznych na zimno lub w podwyższonych temperaturach, bez konieczności międzyoperacyjnej obróbki cieplnej,
 - możliwość znaczącego obniżenia sił nacisku narzędzi kształtujących,
 - zmniejszenie nakładu energii niezbędnej dla uzyskania jednostkowej wielkości odkształcenia zastępczego,
 - możliwość uzyskania ultra drobnoziarnistej, w tym nanometrycznej struktury materiału,
 - uzyskanie nietypowego zespołu właściwości użytkowych wyrobów gotowych.
5. Aktualny stan rozpoznania możliwości praktycznego zastosowania innowacyjnych procesów narastającego kształtowania plastycznego jest w fazie wstępnych badań. Niezbędne jest prowadzenie prac badawczych, które

gression of these tests. In the reverse torsion test performed on copper, at $\alpha = 12^\circ$, an elastic limit of $\varepsilon_g = 131.5$ was achieved over 1199 torsion cycles (Fig. 16 a). At other torsion angles, $\alpha = 24^\circ$ and 60° , achieved elastic limit values amounted to, respectively, $\varepsilon_g = 62.5$ and 37 (Fig. 16 b and c).

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

1. *The distribution and magnitude of local strain, achieved in incremental forming processes, differ significantly from local strain occurring in classical metal forming processes.*
2. *Innovative incremental forming processes expand the possibilities of influencing the magnitude and distribution of a local strain, the value of the press load, and the material's microstructure.*
3. *The new and innovative incremental forming processes presented in this paper open up new horizons for metal forming processes.*
4. *The fundamental advantages of innovative incremental forming processes are:*
 - *capability of achieving large strains through cold forming and forming at elevated temperatures, without the necessity of inter-operational heat treatment,*
 - *capability of significant press load reduction,*
 - *reduction of energy consumption required to obtain a specific magnitude of the effective strain,*
 - *capability of obtaining an ultra-fine grained material microstructure, including a nanometric microstructure,*
 - *obtainment of an atypical set of functional properties in final products.*
5. *The current status of identification of the possibilities of practical implementation of innovative incremental forming processes is in the preliminary testing phase. It is necessary to conduct research work that will make it*

pozwolą na określenie rezerw w zakresie możliwości kształtowania struktury i właściwości użytkowych dla konkretnych grup wyrobów.

6. Wykazane w badaniach technologicznej plastyczności różnice wielkości naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia granicznego, pomiędzy próbami plastometrycznymi charakteryzującymi się proporcjonalnym i monotonicznym przebiegiem odkształcenia i próbami charakteryzującymi się cyklicznie zmiennym przebiegiem odkształcenia, stwarzają konieczność opracowania nowych zależności opiewających ilościowe zależności naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia granicznego od parametrów charakteryzujących przebieg procesu kształtowania.
7. Modelowanie i symulacja komputerowa procesów narastającego kształtowania plastycznego wymaga opracowania nowych funkcji naprężenia uplastyczniającego i odkształcenia granicznego, uwzględniających historię przebiegu odkształcenia dla warunków przebiegu odkształceń lokalnych występujących w tych procesach.
8. Wskazane byłoby prowadzenie dalszych badań nad mechanizmami odkształcenia plastycznego oraz określeniem zakresu parametrów pozwalających uzyskać najbardziej korzystne efekty w zakresie sił i pracy odkształcenia plastycznego oraz efektów strukturalnych decydujących o właściwościach użytkowych wyrobów.

PODZIĘKOWANIE

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

possible to determine reserves in the scope of microstructure development capabilities and functional properties for specific product groups.

6. *The differences in the value of flow stress and strain to fracture shown in plastometric tests characterized by a proportional and monotonic progression of strain and tests characterized by a cyclically variable progression of strain create the necessity of finding new dependencies describing the quantitative dependencies of flow stress and strain to fracture on parameters characterizing the progression of the forming process.*
7. *Computerized modeling and simulation of incremental forming processes require the development of new functions of flow stress and strain to fracture, accounting for the deformation history under conditions of the progression of local deformations occurring in these processes.*
8. *It would also be advisable to conduct further studies on the mechanisms of plastic deformation and on determining the range of parameters enabling achievement of the most favorable effects in the scope of the forces and work of plastic deformation, as well as in the scope of microstructural effects decisive to the functional properties of products.*

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme – Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund – Project “Modern material technologies in aerospace industry”, No POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA

- [1] Grosman F.: *New opportunities in the fields of structure forming and decreasing the force parameters in metal forming processes*. Materiały konferencyjne "MEFORM 2003", Freiberg 26-28.03.2003.
- [2] Gronostajski Z., Grosman F., Jaśkiewicz K., Pawlicki J.: *Effect of variable deformation path on material's force-energy parameters and structure*. *Research in Polish Metallurgy At the Beginning of XXI Century*. Committee of Metallurgy of the Polish Academy of Science. Kraków 2006, s. 347–368.
- [3] Niewielski G., Kuc D., Rodak K., Grosman F., Pawlicki J.: *Influence of strain on the copper structure under controlled deformation path conditions*. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* vol. 17 nr 1–2 (2006), s. 109–112.
- [4] Gronostajski Z., Misiólek W.: *The effect of cyclic strain path on the properties and structure of CuAl10 aluminium bronze*. *J. Mater. Proc. Technol.* nr 155–156 (2004), s. 1138–1143.
- [5] Pawlicki J.: *Wpływ historii odkształcenia na naprężenie uplastyczniające w procesach odkształcenia plastycznego na zimno*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Pawlicki J., Grosman F.: *Analiza efektów siłowo-energetycznych dla procesów z wymuszoną drogą odkształcenia*. *Rudy i Metale Nieżelazne* nr 10–11 (2003), s. 479–483.
- [7] Pawlicki J., Grosman F.: *Analysis of power-energy effects for processes with forced deformation path*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. IV nr 3 (2004), s. 45–55.
- [8] Grosman F., Pawlicki J.: *Concepts of technological applications in controlled deformation of materials*. *Proceedings of the 7th International Conference on Technology of Plasticity*, oct.27-nov.1, 2002, Yokohama. *Japan Advanced technology of plasticity* vol. 1, s. 1219–1224.
- [9] Grosman F.: *Charakterystyki technologicznej plastyczności materiałów – stan aktualny a oczekiwania*. *Rudy i Metale Nieżelazne* nr 10–11 (2003), s. 466–468.
- [10] Grosman F., Tkocz M.: *Application of the formability limit function in prediction of the material fracture*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. IV nr 3 (2004), s. 78–84.
- [11] Pawlicki J., Grosman F.: *Naprężenie uplastyczniające materiałów metalicznych w warunkach cyklicznie zmiennych złożonych stanów obciążeń*. *Hutnik Wiadomości Hutnicze* nr 5 (2007), s. 239–243.
- [12] Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R.: *Incremental Bulk Metal Forming*. *Annals of the CIRP* vol. 56/2/2007, s. 635–656.
- [13] Korbel A., Bochniak W.: *Lüders deformation and superplastic flow of metals extruded by KOBO method*. *A Philosophical Magazine* vol. 93 nr 15 (2013), s. 1883–1913.

REFERENCES

- [1] Grosman F.: *New opportunities in the fields of structure forming and decreasing the force parameters in metal forming processes*. Materiały konferencyjne "MEFORM 2003", Freiberg 26-28.03.2003.
- [2] Gronostajski Z., Grosman F., Jaśkiewicz K., Pawlicki J.: *Effect of variable deformation path on material's force-energy parameters and structure*. *Research in Polish Metallurgy At the Beginning of XXI Century*. Committee of Metallurgy of the Polish Academy of Science. Kraków 2006, pp. 347–368.
- [3] Niewielski G., Kuc D., Rodak K., Grosman F., Pawlicki J.: *Influence of strain on the copper structure under controlled deformation path conditions*. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* vol. 17 no. 1–2 (2006), pp. 109–112.
- [4] Gronostajski Z., Misiólek W.: *The effect of cyclic strain path on the properties and structure of CuAl10 aluminium bronze*. *J. Mater. Proc. Technol.* no. 155–156 (2004), pp. 1138–1143.
- [5] Pawlicki J.: *Wpływ historii odkształcenia na naprężenie uplastyczniające w procesach odkształcenia plastycznego na zimno*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Pawlicki J., Grosman F.: *Analiza efektów siłowo-energetycznych dla procesów z wymuszoną drogą odkształcenia*. *Rudy i Metale Nieżelazne* no. 10–11 (2003), pp. 479–483.
- [7] Pawlicki J., Grosman F.: *Analysis of power-energy effects for processes with forced deformation path*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. IV no. 3 (2004), pp. 45–55.
- [8] Grosman F., Pawlicki J.: *Concepts of technological applications in controlled deformation of materials*. *Proceedings of the 7th International Conference on Technology of Plasticity*, oct.27-nov.1, 2002, Yokohama. *Japan Advanced technology of plasticity* vol. 1, pp. 1219–1224.
- [9] Grosman F.: *Charakterystyki technologicznej plastyczności materiałów – stan aktualny a oczekiwania*. *Rudy i Metale Nieżelazne* no. 10–11 (2003), pp. 466–468.
- [10] Grosman F., Tkocz M.: *Application of the formability limit function in prediction of the material fracture*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. IV no. 3 (2004), pp. 78–84.
- [11] Pawlicki J., Grosman F.: *Naprężenie uplastyczniające materiałów metalicznych w warunkach cyklicznie zmiennych złożonych stanów obciążeń*. *Hutnik Wiadomości Hutnicze* no. 5 (2007), pp. 239–243.
- [12] Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R.: *Incremental Bulk Metal Forming*. *Annals of the CIRP* vol. 56/2/2007, pp. 635–656.
- [13] Korbel A., Bochniak W.: *Lüders deformation and superplastic flow of metals extruded by KOBO method*. *A Philosophical Magazine* vol. 93 no. 15 (2013), pp. 1883–1913.

- [14] Korbel A., Bochniak W., Ostachowski P., Błaż L.: *Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme. Metallurgical and Materials Transactions A* vol. 42a September (2011), s. 2881–2897.
- [15] Richert J.: *Innowacyjne metody przeróbki plastycznej metali*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.
- [16] Grosman F., Pawlicki J.: *Niekonwencjonalne sposoby kształtowania objętościowego. Hutnik Wiadomości Hutnicze* nr 5 (2008), s. 231–235.
- [17] Bochniak W., Korbel A., Szyndler R., Hanarz R., Stalony-Dobrzański F., Błaż L., Snarski P.: *New forging method of bevel gears from structural steel. Journal of Materials Processing Technology* vol. 173 (2006), s. 75–83.
- [18] Cyganek Z., Grosman F.: *Influence of MEFASS rolling parameters on temperature of formed strip. Acta Metallurgica Slovaca* vol. 13 nr 2 (2007), s. 156–162.
- [19] Grosman F., Cyganek Z.: *The research of rolling process with cyclic change of the strain path. Metal Forming Conference 2008. Steel Research International* vol. 79 (2008), Special Edition, s. 453–458.
- [20] Milenin A., Grosman F., Madej L., Pawlicki J.: *Development and validation of the numerical model of rolling process with cyclic horizontal movement of rolls. Steel Research International* vol. 81 (2010), s. 204–209.
- [21] Grosman F., Cyganek Z.: *The research of rolling process with cyclic change of the strain path. Metal Forming Conference 2008. Steel Research International* vol. 79 (2008), Special Edition, s. 453–458.
- [22] Nowak J., Madej L., Plewiński A., Ziółkiewicz S., Grosman F., Pietrzyk M.: *Recent development in orbital forging technology, Mat. Konf. Esaform 2008, Lyon, 1-4, CD*.
- [23] Nowak J., Madej L., Pietrzyk M., Plewiński A., Ziółkiewicz S., Grosman F.: *Computer aided technology design for the modified orbital forging. 9th ICTP 2008 Gyeongju, Korea, s. 1949–1954*.
- [24] Nowak J., Madej L., Pietrzyk M., Grosman F., Ziółkiewicz S., Plewiński A.: *The incremental forming approach based on the modified classical orbital forging technology. Materials Science and Technology (MS&T) 2009, October 25–29, 2009, Pittsburgh, Pennsylvania*.
- [25] Grosman F., Madej L., Ziółkiewicz S., Nowak J.: *The new incremental forming process. Metalurgia* (2010), s. 223–241.
- [26] Nowak J., Madej L., Grosman F., Pietrzyk M.: *The material flow analysis in the modified orbital forging technology. Materials Science Forum* nr 654–656 (2010), s. 1622–1625.
- [27] Grosman F., Tkocz M., Pawlicki J., Lipska B.: *Wytwarzanie elementów integralnych w procesie kształtowania segmentowego. Hutnik* R. 79 nr 8 (2012), s. 583–586.
- [14] Korbel A., Bochniak W., Ostachowski P., Błaż L.: *Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme. Metallurgical and Materials Transactions A* vol. 42a September (2011), pp. 2881–2897.
- [15] Richert J.: *Innowacyjne metody przeróbki plastycznej metali*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.
- [16] Grosman F., Pawlicki J.: *Niekonwencjonalne sposoby kształtowania objętościowego. Hutnik Wiadomości Hutnicze* no. 5 (2008), pp. 231–235.
- [17] Bochniak W., Korbel A., Szyndler R., Hanarz R., Stalony-Dobrzański F., Błaż L., Snarski P.: *New forging method of bevel gears from structural steel. Journal of Materials Processing Technology* vol. 173 (2006), pp. 75–83.
- [18] Cyganek Z., Grosman F.: *Influence of MEFASS rolling parameters on temperature of formed strip. Acta Metallurgica Slovaca* vol. 13 no. 2 (2007), pp. 156–162.
- [19] Grosman F., Cyganek Z.: *The research of rolling process with cyclic change of the strain path. Metal Forming Conference 2008. Steel Research International* vol. 79 (2008), Special Edition, pp. 453–458.
- [20] Milenin A., Grosman F., Madej L., Pawlicki J.: *Development and validation of the numerical model of rolling process with cyclic horizontal movement of rolls. Steel Research International* vol. 81 (2010), pp. 204–209.
- [21] Grosman F., Cyganek Z.: *The research of rolling process with cyclic change of the strain path. Metal Forming Conference 2008. Steel Research International* vol. 79 (2008), Special Edition, pp. 453–458.
- [22] Nowak J., Madej L., Plewiński A., Ziółkiewicz S., Grosman F., Pietrzyk M.: *Recent development in orbital forging technology, Mat. Konf. Esaform 2008, Lyon, 1-4, CD*.
- [23] Nowak J., Madej L., Pietrzyk M., Plewiński A., Ziółkiewicz S., Grosman F.: *Computer aided technology design for the modified orbital forging. 9th ICTP 2008 Gyeongju, Korea, pp. 1949–1954*.
- [24] Nowak J., Madej L., Pietrzyk M., Grosman F., Ziółkiewicz S., Plewiński A.: *The incremental forming approach based on the modified classical orbital forging technology. Materials Science and Technology (MS&T) 2009, October 25–29, 2009, Pittsburgh, Pennsylvania*.
- [25] Grosman F., Madej L., Ziółkiewicz S., Nowak J.: *The new incremental forming process. Metalurgia* (2010), pp. 223–241.
- [26] Nowak J., Madej L., Grosman F., Pietrzyk M.: *The material flow analysis in the modified orbital forging technology. Materials Science Forum* no. 654–656 (2010), pp. 1622–1625.
- [27] Grosman F., Tkocz M., Pawlicki J., Lipska B.: *Wytwarzanie elementów integralnych w procesie kształtowania segmentowego. Hutnik* vol. 79 no. 8 (2012), pp. 583–586.

- [28] Madej L, Węglarczyk S, Grosman F.: *Numerical modeling of bulk metal forming processes with induced strain path change. Computer Methods in Materials Science* vol. 9 nr 2 (2009), s. 234–240.
- [29] Pęcherski R.B.: *Opis deformacji plastycznej metali z efektami mikropasm ścinania*. Praca habilitacyjna, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN 1998.
- [30] Grosman F.: *Application of a Flow Stress Function in Programmes for Computer Simulation of Plastic Working Processes. Journal of Materials Processing Technology* vol. 64 (1997), s. 169–180.
- [31] F. Grosman: *Criteria of flow stress function choice for numerical simulation of plastic forming processes*. Mat. Konf. International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials, THERMEC'97, 1–11 July 1997, University of Wollongong, Australia, vol. II, s. 2047–2052.
- [32] Grosman F., Pawlicki J.: *Wpływ parametrów ściskania z oscylacyjnym skręcaniem na technologiczną plastyczność metali. Rudy i Metale Nieżelazne* nr 10–11 (2005), s. 590–594.
- [28] Madej L, Węglarczyk S, Grosman F.: *Numerical modeling of bulk metal forming processes with induced strain path change. Computer Methods in Materials Science* vol. 9 no. 2 (2009), pp. 234–240.
- [29] Pęcherski R.B.: *Opis deformacji plastycznej metali z efektami mikropasm ścinania*. Praca habilitacyjna, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN 1998.
- [30] Grosman F.: *Application of a Flow Stress Function in Programmes for Computer Simulation of Plastic Working Processes. Journal of Materials Processing Technology* vol. 64 (1997), pp. 169–180.
- [31] F. Grosman: *Criteria of flow stress function choice for numerical simulation of plastic forming processes*. Mat. Konf. International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials, THERMEC'97, 1–11 July 1997, University of Wollongong, Australia, vol. II, pp. 2047–2052.
- [32] Grosman F., Pawlicki J.: *Wpływ parametrów ściskania z oscylacyjnym skręcaniem na technologiczną plastyczność metali. Rudy i Metale Nieżelazne* no. 10–11 (2005), pp. 590–594.