



Innowacyjne technologie obróbki plastycznej metali rozwijane w Politechnice Lubelskiej

Innovative metal forming technologies developed at Lublin University of Technology

(1) Zbigniew Pater*, (2) Janusz Tomczak

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 12.05.2015

Data recenzji: 30.07.2015

Data akceptacji: 30.09.2015

Wkład autorów

- (1) Koncepcja, założenia, przeprowadzenie badań, przygotowanie artykułu, edycja
- (2) Koncepcja, założenia, przeprowadzenie badań, przygotowanie artykułu, edycja

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano wybrane zagadnienia z zakresu nowych innowacyjnych technologii kształtowania plastycznego metali i stopów, rozwijanych w ostatnim okresie w Politechnice Lubelskiej. Przedstawione technologie związane są głównie z procesami rotacyjnego kształtowania, w których najczęściej wykorzystuje się narzędzia wykonujące ruch obrotowy. W stosunku do tradycyjnych metod procesy rotacyjnego kształtowania charakteryzują się szeregiem zalet, do których można zaliczyć: dużą wydajność, mniejsze zużycie materiałów i energii, mniejsze wartości sił kształtowania dzięki stopniowemu odkształcaniu materiału, korzystniejszy układ struktury, wpływający na poprawę własności wytrzymałościowych oraz łatwą mechanizację i automatyzację procesu. Natomiast podstawowym ograniczeniem technologii wytwarzania odkuwek bazujących na procesach walcowniczych (zwłaszcza walcowania poprzecznego) jest niebezpieczeństwo pojawienia się niekontrolowanych poślizgów. Również znaczna część tego typu technologii charakteryzuje się dość dużym stopniem skomplikowania narzędzi, co przejawia się trudnościami w ich projektowaniu i następnie wykonaniu. Duże zapotrzebowanie na elementy, które mogą być wytwarzane z udziałem technik rotacyjnego kształtowania spowodowały, że podjęto prace podawcze, zmierzające do przemysłowego wdrożenia tych metod. Z uwagi na ograniczoną objętość opracowania, bardziej szczegółowo omówiono tylko wybrane metody kształtowania, takie jak: walcowanie poprzeczno-klinowe (WPK), obciskanie obrotowe, walcowanie wzdłużne oraz walcowanie skośne. Wspomniane technologie mogą być wykorzystane do kształtowania pełnych i drążonych odkuwek o symetrii osiowej. Scharakteryzowano również opracowane w Politechnice Lubelskiej konstrukcje maszyn, zabezpieczających realizację poszczególnych procesów wytwarzania, na które to maszyny uzyskano prawa ochronne. Przedstawiono także przykłady zastosowania wymienionych procesów, w tym dotyczące kształtowania wyrobów drążonych oraz elementów ze stopów metali lekkich, które znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym. Wyczerpujący opis przybliżonych w artykule technologii znaleźć można w licznych publikacjach naukowych autorów opracowania, których zestawienie zamieszczono na końcu artykułu.

Słowa kluczowe: walcowanie kuźnicze, maszyny, odkuwki

Article info

Received: 12.05.2015

Reviewed: 11.09.2015

Accepted: 30.09.2015

Abstract

This paper describes selected problems regarding innovative forming techniques for metals and alloys which have been developed at the Lublin University of Technology in recent years. These techniques mainly concern rotary forming processes which are usually based on the use of rotating tools. Compared to traditional methods, rotary forming processes offer a number of advantages such as high efficiency, reduced material and energy consumption, lower forming forces due to gradual material deformation and higher strength properties due to favourable structure. Not to mention the fact that these processes are easy to mechanize and automate. As for shortcomings, the basic limitation of forming methods based on rolling processes (especially on cross rolling) is the

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 81 538 42 42; fax: +48 81 538 42 33; e-mail: z.pater@pollub.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 81 538 42 42; fax: +48 81 538 42 33; e-mail: z.pater@pollub.pl

Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, testing, preparation of the article, editing
- (2) Concept, assumptions, testing, preparation of the article, editing

risk of uncontrolled slipping. In addition to this, many of these methods require the use of complicated tools that are difficult to design and construct. Given a huge demand for parts which can be manufactured by rotary forming techniques, research works have been undertaken to investigate industrial implementation of these methods. Since the scope of this paper is limited, the paper discusses at length only a selection of rotational forming methods, including cross wedge rolling (CWR), rotary compression, longitudinal rolling and helical rolling. The above methods can be applied to produce both solid and hollow axisymmetric parts. The paper also describes machines for these manufacturing processes. The machines were developed at the Lublin University of Technology and secured by patent. What is also presented are examples of applications for the above manufacturing processes, including those for producing hollow products and light metal alloy parts which are more widely used in the automotive and aircraft industries. The above forming techniques are described in detail in numerous publications by the authors of this paper listed in the reference section.

Keywords: wedge rolling, machines, forgings

1. WPROWADZENIE

Procesy wytwarzania podlegają ciągłej modernizacji mającej na celu przede wszystkim zmniejszenie materiałochłonności i energochłonności. Oprócz doskonalenia obecnie stosowanych metod wytwarzania poszukiwane są także nowe, wysokowydajne procesy produkcyjne spełniające pokładane wymagania. Prace tego typu prowadzone są w większości krajowych jednostek naukowych i obejmują różne techniki wytwarzania, w tym obróbkę plastyczną metali i ich stopów.

W Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej od ponad 35 lat prowadzone są badania w zakresie obróbki plastycznej metali, które w ostatnim okresie ukierunkowane zostały na opracowanie nowych innowacyjnych metod kształtowania plastycznego takich, jak: walcowanie kuźnicze [1, 2], obciskanie obrotowe [3–5], kucie w prasie trójsuwakowej [6, 7], prasowanie obwiedniowe [8, 9], przepychanie obrotowe [10]. Wymiernym efektem tych prac jest m.in. 65 krajowych i 5 europejskich patentów chroniących uzyskane rozwiązania, które otrzymano w okresie zaledwie trzech lat (2013–2015).

W bieżącym artykule ze względu na objętość opracowania ograniczono się wyłącznie do scharakteryzowania innowacyjnych procesów w zakresie walcowania kuźniczego, stanowiącego główny obszar badawczy pracowników Politechniki Lubelskiej. Podano przykłady zastosowania tych procesów oraz maszyny zabezpieczające ich realizację.

1. INTRODUCTION

Manufacturing processes undergo a constant modernization, aiming at reduction of material and energy consumption. Apart from improving used so far manufacturing methods, new ones of high efficiency and meeting requirements are also being searched for. Research on this are conducted in majority of domestic scientific units and concern various manufacturing techniques, including metal forming of metals and their alloys.

At the Mechanical Faculty of the Lublin University of Technology, research within the scope of metals forming have been carried out for more than 35 years, they have been directed recently at working out new, innovative methods of metal forming, such as: longitudinal rolling [1, 2], rotary compression [3–5], forging in a three-slide forging press [6, 7], orbital forging [8, 9] and rolling extrusion [10]. A measurable effect of these works can be seen in 65 domestic and 5 European patents protecting the obtained solutions, which were obtained within the frame of three years (2013–2015).

In this paper, due to its size limits, only innovative processes within the scope of rolling, constituting the main area of research of the Lublin University of Technology workers, were characterized. Examples of these processes application and machines guaranteeing their realization were given.

2. WALCOWANIE POPRZECZNO-KLINOWE

Proces walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) stosowany jest głównie do wytwarzania stopniowanych osi i wałków oraz osiowo-symetrycznych przedkuwek [1, 2]. W ostatnich latach z powodzeniem zaczęto go również wykorzystywać do kształtowania części drążonych [11, 12] oraz elementów o kształtach złożonych [13, 14], jak również do dzielenia bezodpadowego metalowych prętów okrągłych [15, 16].

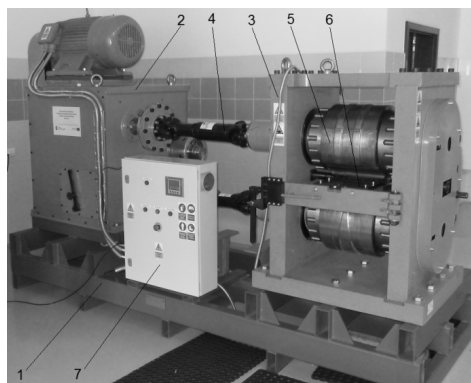
W procesie WPK wykorzystywane są narzędzia w kształcie klinów, które montowane są najczęściej nad dwóch walcach, bądź dwóch płaskich płytach walcarek. W Politechnice Lubelskiej opracowano konstrukcję walcarki z dwoma walcami [17], która obecnie zainstalowana jest w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Chełmie. Walcarka ta charakteryzuje się szerokim zakresem możliwości technologicznych i pozwala na realizację takich procesów kształtowania, jak: walcowanie poprzeczne i poprzeczno-klinowe, dzielenie bezodpadowe oraz walcowanie wzdłużne. Ma ona segmentową strukturę i składa się z sześciu podstawowych zespołów (rys. 1): ramy nośnej, zespołu napędowego, klatki walców roboczych, układu przeniesienia napędu, układu zasilania elektrycznego i sterowania oraz układu pomiarowego. W przestrzeni roboczej walcarki zamontowano na wałach głównych dwa zestawy segmentów narzędziowych, na powierzchniach których wykonane są klinowe występy kształtujące odkuwkę, charakteryzowane przez takie parametry, jak: kąt rozwarcia klina $\beta=16^\circ$, kąt kształtowania $\alpha=45^\circ$. Narzędzia te wykorzystano do kształtowania wałka stopniowanego ze stopu aluminium w gatunku 6061 (rys. 2), walcowanego z wsadu $\varnothing 30 \times 150$ mm i nagrzewanego w piecu elektrycznym komorowym do temperatury kształtowania wynoszącej około 480°C . Uzyskane wyroby odznaczały się dużą dokładnością i powtarzalnością kształtu.

2. CROSS-WEDGE ROLLING

The cross-wedge rolling process (CWR) applied mainly for manufacturing of stepped axles and shafts and axi-symmetrical preforms [1, 2]. In recent years, it has been also successfully used for forming of hollow parts [11, 12] and elements of complex shapes [13, 14], and for waste-free splitting of metal round bars [15, 16].

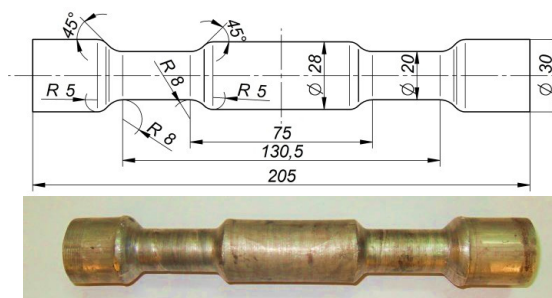
In the CWR process tools in the form of wedges are used, which are usually mounted on

two rolls or two flat plates of rolling mills. At Lublin University of Technology, a rolling mill with two rolls [17] was worked out, it is presently installed at PWSZ in Chełm. This rolling mill is characterized by a wide scope of technological possibilities and allows for realization of such forming processes as: cross and cross-wedge rolling, waste-free splitting and longitudinal rolling. It has a segment structure and consists of six basic subsets (Fig. 1): carrying frame, drive unit, working rolls box, drive transmission unit, power supply system, steering system and measuring system. In the rolling mill work space, on the main shafts, there were mounted two sets of tool segments with wedge protrusions on their surfaces forming the workpiece and characterized by such parameters as: spreading angle $\beta=16^\circ$, forming angle $\alpha=45^\circ$. These tools were used for forming of a stepped shaft from aluminum alloy of 6061 type (Fig. 2), rolled from billet $\varnothing 30 \times 150$ mm and heated in the electric box-type furnace to the forming temperature equal about 480°C . The obtained products were characterized by a large precision and shape repeatability.



Rys. 1. Uniwersalna dwuwalcowa walcarka kuźnicza do walcowania poprzeczno-klinowego i wzdłużnego:
1 – rama nośna, 2 – układ napędowy, 3 – klatka robocza, 4 – wały przegubowe, 5 – walce robocze,
6 – prowadnica, 7 – szafa sterownicza

Fig. 1. Universal two-rolls forging rolling mill for cross-wedge rolling and longitudinal rolling:
1 – carrying frame, 2 – drive, 3 – working box, 4 – jointed shafts, 5 – working rolls,
6 – guiding device, 7 – steering cupboard

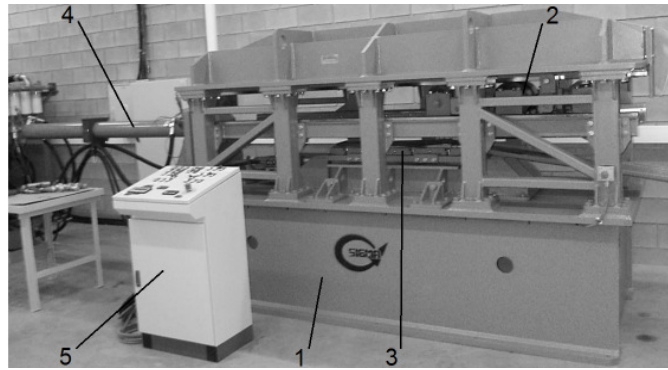


Rys. 2. Wałek stopniowany ze stopu aluminium 6061 odwalcowany w uniwersalnej walczarce kuźniczej

Fig. 2. Stepped shaft from aluminium alloy 6061 rolled in universal forging rolling mill

W Politechnice Lubelskiej opracowano także walcarkę płaskoklinową (rys. 3), która została wykonana jako ażurowa konstrukcja skręcana, składająca się z korpusu dolnego, korpusu górnego oraz układu jezdnego (suwak i prowadnice boczne suwaka) [18]. Narzędzie górne, mocowane jest do płyty suwaka, który ma możliwość przemieszczania się wraz z narzędziem wzdłuż osi maszyny, natomiast narzędzie dolne (stałe) mocowane jest do stołu maszyny. Napęd suwaka realizowany jest przy pomocy siłownika hydraulicznego o skoku wynoszącym 2000 mm. Maszyna ta umożliwia kształtowanie dużych wyrobów o średnicy do 70 mm oraz długości do 400 mm. Przykład wyrobu uzyskanego w procesie walcowania w tej maszynie stanowi wał przekładni tylnej śmigłowca, kształtowany w układzie podwójnym, pokazany na rys. 4.

At Lublin University of Technology also a flat wedge rolling mill was worked out (Fig. 3), which was made as openwork twisted construction, consisting of the bottom body, upper body and moveable unit (slide and side guiding devices without slide) [18]. The upper tool is mounted to the plate of the slide, which has the possibility of moving together with the tool along the machine axis, yet, the bottom tool (constant) is mounted to the machine table. The slide drive is realized by means of hydraulic servo-motor of stroke equal 2000 mm. This machine allows for forming of large products with diameter up to 70 mm and length up to 400 mm. The example of product obtained in the rolling process by means of this machine is a helicopter rear gear shaft, formed in a double configuration, shown in Fig. 4.



Rys. 3. Walcarka płaskoklinowa o napędzie hydraulicznym posadowiona w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej: 1 – korpus, 2 – suwak wraz z zespołem jezdnym, 3 – narzędzie klinowe, dolne, 4 – siłownik napędowy suwaka, 5 – pulpit sterowniczy

Fig. 3. Flat-wedge rolling mill with hydraulic drive place at Mechanical Faculty of Lublin University of Technology: 1 – body, 2 – slide with moveable unit, 3 – wedge tool, bottom, 4 – slide drive servo-motor 5 – control desk



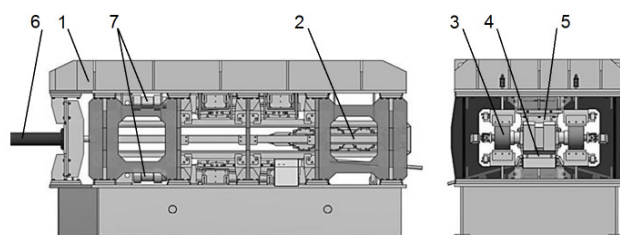
Rys. 4. Wałki stopniowane (ze stali C45) odwalcowane w układzie podwójnym w hydraulicznej walcarki płaskoklinowej
Fig. 4. Stepped shafts from steel C45 rolled in double configuration in hydraulic flat-wedge rolling mill

Obecnie w Politechnice Lubelskiej trwają prace nad wykonawstwem innowacyjnej walcarki płaskoklinowej, pozbawionej ruchu jałowego. W oparciu o tę maszynę planowane jest uruchomienie produkcji kul na mielniki, kształtowanych bezpośrednio z główki złomowanej szyny kolejowej [19]. Prace projektowe zostały poprzedzone określeniem głównych założeń konstrukcyjno-technologicznych. Przyjęto, że suwak roboczy walcarki będzie napędzany siłownikiem hydraulicznym dwustronnego działania, przy czym w trakcie cyklu roboczego nie będzie występował ruch jałowy (powrót suwaka do położenia początkowego), a sam cykl roboczy będzie składał się z dwóch etapów. Pierwszy etap będzie realizowany pomiędzy płaskimi narzędziami, które zamocowane będą do górnego korpusu oraz górnej powierzchni suwaka. W trakcie tego etapu będzie kształtowany pręt o przekroju kołowym z półfabrykatu w kształcie odcinka główki odciętej od złomowanej szyny kolejowej. Drugi etap będzie reali-

At present, at Lublin University of Technology research works on manufacturing of an innovative flat wedge rolling mill free from lost motion are carried out. Basing on this machine, it is planned to start production of balls for grinding mediums, formed directly from the head of scrapped rail [19]. Design works were preceded by determining main constructional-technological assumptions. It was assumed that the rolling mill work slide will be driven by hydraulic servo-motor of duplex operation. Yet, during the working cycle no lost motion will take place (slide returning to its initial position) and the working cycle will consist of two stages. The first stage will be realized between flat tools, which will be mounted to the upper body and the upper surface of the slide. During this stage a bar of circular section will be formed from a semi-finished product in the shape of a cut off head of the scrapped rail. The second stage will be realized between flat plates

zowany pomiędzy płytami płaskimi o wklęsłych występkach kształtujących, które zamocowane będą do dolnego korpusu walcarki oraz dolnej powierzchni suwaka. W trakcie tego etapu będzie jednocześnie kształtowanych kilka kul (w ilości uzależnionej od ich średnicy) z pręta odwalcowanego w poprzednim etapie, przy czym przemieszczanie półfabrykatu z pierwszego etapu do drugiego etapu będzie odbywało się automatycznie. Założono też, że ukształtowane kule będą usuwane samoczynnie z przestrzeni roboczej walcarki do pojemników ustawianych za maszyną (rys. 5).

of concave forming protrusions, which will be mounted to the bottom body of the rolling mill and the bottom surface of the slide. During this stage, a few balls from the bar rolled at the previous stage will be formed simultaneously. Yet, the semi-finished product displacement from the first stage to the second one will take place automatically. It was also assumed that the formed balls will be removed automatically from the rolling mill work space to containers placed behind the machine (Fig. 5).



Rys. 5. Projekt nawrotnej walcarki płaskoklinowej, opracowanej w Politechnice Lubelskiej w ramach programu INNOTECH: 1 – korpus, 2 – suwak, 3 – układ jezdny suwaka, 4 – zespół narzędziowy dolny, 5 – zespół narzędziowy górny, 6 – silownik napędowy suwaka, 7 – silowniki ustawcze narzędzi

Fig. 5. Project of a reversible flat-wedge rolling mill, worked out at Lublin University of Technology within the scope of INNOTECH programme: 1 – body, 2 – slide, 3 – slide moveable unit, 4 – bottom tools unit, 5 – upper tools unit, 6 – slide drive servo-motor, 7 – tools adjustment servo-motors

3. OBCISKANIE OBROTOWE

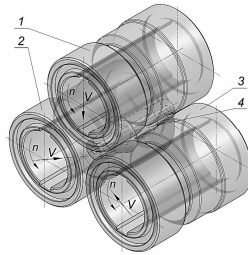
Technologia obciskania obrotowego pozwala na plastyczne kształtowanie osiowosymetrycznych odkuwek drążonych, stopniowanych osi i wałów [20, 21]. Proces ten polega na redukowaniu przekroju poprzecznego półfabrykatu rurowego trzema jednakowymi walcami, które obracają się w tym samym kierunku i jednocześnie przemieszczają się promieniowo w kierunku osi elementu (rys. 6). Kształt walców (1, 2, 3) odpowiada zarysowi obciskanej odkuwki (4), zaś wsad stanowi odcinek rury lub tulei. W początkowym etapie procesu półfabrykat umieszczony jest między walcami i w trakcie obciskania obracany jest przez narzędzia dookoła własnej osi. W efekcie oddziaływania narzędzi następuje redukcja średnicy zewnętrznej kolejnych stopni wyrobu, czemu towarzyszy wzrost grubości ścianki wsadu oraz długości skrajnych czopów. W stosunku do obecnie stosowa-

3. ROTARY COMPRESSION

Technology of rotary compression allows for metal forming of axi-symmetrical hollow parts, stepped axles and shafts [20, 21]. This process is based on reduction of cross section of a pipe semi-finished product by means of three equal rolls rotating in the same direction and moving radially in the direction of element axis at the same time (Fig. 6). Rolls shape (1, 2, 3) corresponds with the outline of the compressed workpiece (4), yet a part of a pipe or bush is used as billet. At the beginning of the process, the semi-finished product is placed between rolls and, during compression, it is rotated by tools around its own axis. In the result of tools acting, reduction of external diameter of the product following steps takes place, which is accompanied by the increase of billet walls thickness and the length of external pins. In comparison with used so far techniques of hollow products manufacturing, ro-

nych technik wytwarzania wyrobów drążonych, obciskanie obrotowe może charakteryzować się szeregiem zalet, z których najważniejsze to: polepszenie własności wytrzymałościowych tak kształtowanych półfabrykatów, zwiększenie wydajności produkcji, mniejsze koszty wdrożeniowe i produkcyjne oraz stosunkowo prosta realizacja procesu, który w łatwy sposób można zmechanizować i zautomatyzować [3–5].

tary compression can be characterized by numerous advantages, the most important of which include: improvement of resistance properties of such formed semi-finished products, increase of the production effectiveness, lower implementation and manufacturing costs and relatively simple process realization, which can be easily mechanized and automatized [3–5].

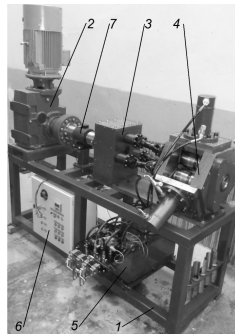


Rys. 6. Schemat procesu obciskania obrotowego drążonej odkuwki wałka stopniowanego:
1, 2, 3 – rolki profilowe, 4 – przedmiot kształtowany

*Fig. 6. Schema of rotary compression process of hollow forging of stepped shaft:
1,2,3 – profiled rolls, 4 – formed product*

Dla realizacji procesu obrotowego obciskania zaprojektowano i zbudowano agregat (rys. 7), w którym narzędzia jednocześnie wykonują ruch obrotowy w zgodnym kierunku i przemieszczają się w kierunku osi półfabrykatu [22]. Maszyna ta ma strukturę segmentową i składa się z siedmiu podstawowych zespołów: ramy nośnej, zespołu napędowego, klatki walców zębatych, klatki walców kształtujących, hydraulicznego układu napędowego walców kształtujących, układu zasilania elektrycznego i sterowania oraz układu pomiarowego.

In order to realize the rotary compression process, an aggregate was designed and built (Fig. 7), in which tools simultaneously rotate in the same direction and move in the direction of the semi-finished axles [22]. This machine has a segment structure and consists of seven basic units: carrying frame, drive unit, toothed rolls box, forming rolls box, hydraulic drive of forming rolls, electric power supply, steering unit, and measuring unit.



Rys. 7. Agregat do obciskania obrotowego wyrobów drążonych: 1 – rama, 2 – zespół napędowy, 3 – przekładnia rozdzielająca napęd, 4 – klatka walców roboczych, 5 – układ zasilania hydraulicznego, 6 – układ sterowania i zasilania elektrycznego, 7 – przetwornik momentu obrotowego

Fig. 7. Aggregate for rotary compression of hollow products: 1 – frame, 2 – drive unit, 3 – drive splitting gear, 4 – working rolls box, 5 – hydraulic power supply unit, 6 – steering system and electric power supply system, 7 – rotary moment converter

Korzystając z technologii obrotowego obciskania, przeprowadzono próby wytwarzania (w skali 1:2, ze względu na możliwości techniczne agregatu) drążonego wału wirnika głównego śmigłowca (ze stali C45). Przed kształtowaniem wsad rurowy nagrzewano do temperatury 1150°C, następnie umieszczano go w przestrzeni roboczej agregatu i poddawano obciskaniu realizowanemu z prędkością obrotową rolek wynoszącą 36 obr/min oraz prędkością przemieszczania liniowego równą 3,5 mm/s. Półwyroby wałków otrzymanych tym sposobem miały prawidłowy kształt i były wolne od wad zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych (rys. 8).

Using technology of rotary compression manufacturing tests were made (in scale 1:2, due to the aggregate technical possibilities) of hollow shaft of the helicopter main rotor (from steel C45). Before forming, pipe billet was heated to the temperature 1150 C, next, it was placed in the aggregate work space and compressed with rolls rotary velocity equal 36 rpm and linear displacement velocity equal 3.5 mm/s. Semi-finished products of shafts obtained by means of this method had appropriate shape and were free from faults, both external and internal (Fig. 8).



Rys. 8. Odkuwka wału wirnika głównego śmigłowca (ze stali w gatunku C45 oraz w skali 1:2), wykonana metodą obciskania obrotowego w agregacie pokazanym na rys. 7

Fig. 8. Forging of helicopter main rotor shaft (from steel C45 type in scale 1:2), made by means of rotary compression method in aggregate shown in Fig. 7

4. WALCOWANIE KUŹNICZE WZDŁUŻNE

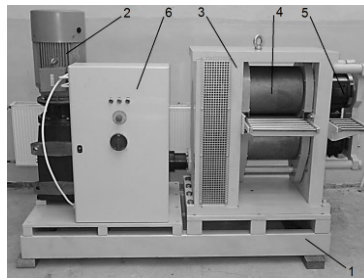
Walcowanie kuźnicze wzdłużne stosowane jest głównie do wytwarzania przedkuwek kutych następnie na gotowo na prasach. Wsadem do walcowania są pręty, najczęściej o przekroju poprzecznym okrągłym lub kwadratowym. Mając na uwadze realizację procesu walcowania kuźniczego w warunkach laboratoryjnych, w Politechnice Lubelskiej zaprojektowano i wykonano walcarkę ramowo-konsolewą [23], którą przedstawiono na rys. 9. Podstawowe zespoły tej walcarki to: rama, silnik elektryczny z motoreduktorem stożkowo-walcowym oraz klatka walcownicza z mimośrodowym układem regulacji rozstawu osi obu wałków. Walcarka ta może być wykorzystywana do walcowania wzdłużnego na beczkach gładkich (układ ramowy) wyrobów takich, jak: blachy, taśmy, folie oraz płaskowniki. W układzie

4. LONGITUDINAL ROLLING

Longitudinal rolling is mainly used for manufacturing of preforms which are, next, forged on presses to their final forms. Bars are used as billet, they are often of circular or square cross section. Considering realization of this rolling process in laboratory conditions, at Lublin University of Technology a frame-console rolling mill was designed [23], which is shown in Fig. 9. The main components of this rolling mill include: frame, electric engine with conical-cylindrical gear motor, rolling stand with eccentric regulation system of both rolls axis spacing. This rolling mill can be used for longitudinal rolling on smooth barrels (frame configuration) of products such as: sheets, tapes, foils and flat bars. In console configuration, processes of furrow

konsolowym mogą być realizowane procesy hutniczego walcowania bruzdowego oraz walcowania kuźniczego na segmentach okresowo zmiennych.

rolling and forging rolling on periodically variable segments.



Rys. 9. Walcarka ramowo-konsolowa, zaprojektowana i wykonana w Politechnice Lubelskiej:
1 – rama, 2 – zespół napędowy, 3 – klatka walcownicza, 4 – wewnętrzne walce gładkie,
5 – wysięgowe walce brzdowe, 6 – układ sterowania i zasilania elektrycznego

Fig. 9. Frame-console rolling mill, designed and manufactured at Lublin University of Technology:
1 – frame, 2 – drive unit, 3 – rolling box, 4 – internal smooth rolls,
5 – outreaching furrow rolls, 6 – steering and electric power supply units

Przykład walcowania kuźniczego zrealizowanego z wykorzystaniem omawianej walcarki, przedstawiony na rys. 10, dotyczy kształtowania przedkuwki dźwigni. Walcowanie realizowane było w systemie owal-koło z wsadu w postaci pręta o średnicy $\varnothing 45$ mm i długości 132 mm. Półfabrykat po walcowaniu w wykroju owalnym obracany był o 90° i następnie walcowany w wykroju kołowym bez dodatkowych zabiegów międzyoperacyjnych. Przedkuwki walcowano ze stopu aluminium w gatunku A2014 w warunkach obróbki plastycznej na gorąco. Wsad przed procesem walcowania nagrzewano w elektrycznym piecu komorowym do temperatury 460°C . Uzyskane przedkuwki charakteryzowały się zadowalającą dokładnością kształtu i wymiarów [24].

The example of longitudinal rolling realized with the application of the discussed rolling mill, shown in Fig. 10, concerns forming of the lever preform. Rolling was realized in configuration oval-circle from billet in the form of a bar of diameter $\varnothing 45$ mm and length 132 mm. A semi-finished product after rolling in oval impression was rotated at 90° and later rolled in circular impression without additional operations. Preforms were rolled from aluminum alloy A2014 type in conditions of metal forming in hot. Rolled billet was heated in the electric box-type furnace to the temperature 460°C . The obtained preforms were characterized by satisfactory shape and dimensions precision [24].



Rys. 10. Przedkuwki dźwigni ze stopu aluminium A2014 wykonane w walcierce ramowo-konsolowej
Fig. 10. Preforms of lever from aluminium alloy A2014 made in frame-console rolling mill

5. WALCOWANIE SKOŚNE

Procesy kuźniczego walcowania skośnego wykorzystywane są w praktyce przemysłowej bardzo rzadko. Wynika to z tego, że narzędzia (walce)

5. SKEW ROLLING

Skew rolling processes are rarely applied in industry. This result from the fact that tools (rolls) used in this process have on the circum-

stosowane w tym procesie mają śrubowo nacięte na obwodzie bruzdy o zmiennym kształcie i skoku, co znacząco utrudnia ich zaprojektowanie. Dlatego też stosowanie walcowania kuźniczego skośnego ograniczone jest do kształtowania wyrobów o stosunkowo prostym kształcie takich, jak pierścienie na łożyska toczne, czy kule wykorzystywane w łożyskach lub młynach kulowych.

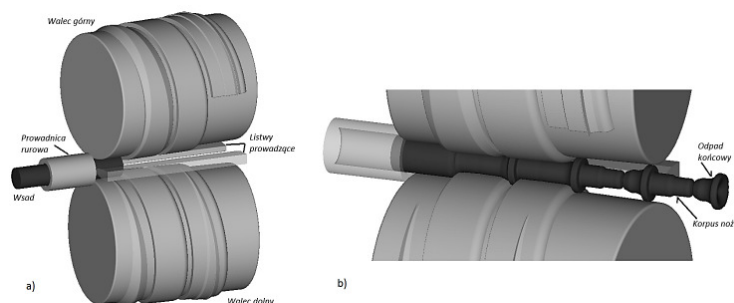
W Politechnice Lubelskiej (w ramach prac odnoszących się do kształtowania plastycznego kul) opracowano nową technologię walcowania skośnego, którą nazwano walcowaniem śrubowo-klinowym (WŚK). W procesie tym kliny nawinięte są na walce w sposób śrubowy jedno- lub wielozwojnie, co umożliwia kształtowanie kul w sposób ciągły. Wykonane prace badawcze bazujące na analizie teoretycznej oraz badaniach doświadczalnych potwierdziły słuszność opracowanej koncepcji walcowania skośnego [25–27].

Obiecujące wyniki uzyskane w zakresie WŚK kul skłoniły zespół badawczy do poszukiwania innych wyrobów, które mogłyby być wytwarzane za pomocą tej nowoczesnej technologii wytwarzania. Wykonane analizy numeryczne (bazujące na MES), szczegółowo opisane w pracach [28–30], wykazały, że metodą WŚK można będzie wytwarzać elementy złączne, stopniowane wałki oraz korpusy noży obrotowych – rys. 11. Równocześnie wskazano na konieczność dalszych prac badawczych w zakresie weryfikacji doświadczalnej procesu WŚK oraz rozszerzenia jego stosowania na inne wyroby, w tym drążone. Kontynuacja prac badawczych wymagać będzie budowy stosownego stanowiska badawczego (walcarki skośnej), które obecnie znajduje się w fazie projektowania.

ference helically cut furrows of variable shape and stroke, which considerably hinders their designing. Hence, skew rolling application is limited to forming of products of relatively simple shape, such as rings for rolling bearings or balls applied in bearings or ball mills.

At Lublin University of Technology (within the scope of research works concerning metal forming of balls), a new technology of skew rolling was worked out, called helical-wedge rolling (HWR). In this process wedges are winded on rolls in a helical way-one or multi coiled paths, which allows continuous balls forming. Conducted research works basing on the theoretical analysis and experiments confirmed the rightness of the assumed skew rolling conception [25–27].

Promising results obtained within the scope of HWR led the research team to search for other products which could be manufactured by means of this innovative manufacturing technology. Numerical analyses (basing on FEM), described in details in works [28–30], showed that by means of HWR it is possible to produce connectors, stepped shafts and rotary knives bodies – Fig. 11. At the same time, it is necessary to conduct further research works within the scope of experimental verification of HWR and its application widening on other products, including hollow ones. Continuation of research works will require building a new research post (skew rolling mill), which is at the designing stage so far.



Rys. 11. Walcowanie śrubowo-klinowe (WŚK) korpusów noży obrotowych: a) model geometryczny procesu; b) wyniki obliczeń numerycznych

Fig. 11. Helical-wedge rolling (HWR) of rotary knives bodies: a) geometrical model of the process; b) results of numerical calculations

6. PODSUMOWANIE

W bieżącym opracowaniu skoncentrowano się na innowacyjnych technologiach walcowania kuźniczego, rozwijanych w Politechnice Lubelskiej. W szczególności omówiono takie technologie, jak walcowanie poprzeczno-klinowe, obciskanie obrotowe, walcowanie wzdłużne oraz walcowanie skośne, które ukierunkowane są na zmniejszenie energo- i materiałochłonności w procesach wytwarzania. Dla wdrożenia przemysłowego wymienionych technologii niezbędne jest posiadanie odpowiednich maszyn, których przykładowe konstrukcje, opracowane przy współdziałaniu autorów, również przedstawiono w bieżącym opracowaniu. Podano także przykłady zastosowania omawianych technologii walcowania kuźniczego, których szerszy opis znaleźć można w opracowaniach zamieszczonych w spisie literatury.

PODZIĘKOWANIA

Praca zrealizowana w ramach umowy nr INNOTECH-K3/IN3/12/226286/NCBR/14 o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego w ramach programu „INNOTECH” w ścieżce programowej IN-TECH.

LITERATURA

- [1] Pater, Zbigniew. 2009. „Walcowanie poprzeczno-klinowe.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [2] Pater, Zbigniew. 2014. Cross-Wedge Rolling. W *Comprehensive Materials Processing*, 211–279. Elsevier Ltd.
- [3] Pater, Z., Tomczak, J., Bulzak, T. 2015. „Experimental study of rotary compression for hollow parts.” *Metalurgija* vol. 54 (2): 419–422.
- [4] Tomczak, J., Pater, Z., Bulzak, T. 2015. „Forming of Hollow Shaft Forging from Titanium Alloy Ti6Al4V by Means of Rotary Compression.” *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (1): 419–425.
- [5] Tomczak, J., Bulzak, T., Pater, Z. 2015. „The Effect of Billet Wall Thickness on the Rotary Compression Process for Hollow Parts.” *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 61 (3): 149–156.
- [6] Weroński, W., Gontarz, A., Pater, Z. 2007. „Wybrane zagadnienia z teorii i technologii kucia w prasie trójsuwakowej.” Lublin: Wyd. LTN.

6. SUMMARY

In this paper the Authors focused on innovative technologies of rolling developed at Lublin University of Technology. Such technologies as cross-wedge rolling, rotary compression, longitudinal rolling and skew rolling, which are directed at energy and material consumption reduction in manufacturing processes, were discussed in details. For industrial implementation of these methods it is necessary to have appropriate machines, which exemplary constructions, worked out with the Authors cooperation, are also presented in this paper. Moreover, examples of the discussed forging rolling technologies, which detailed description can be found in works listed in Literature, are given as well.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed within the scope of Agreement No. INNOTECH-K3/IN3/12/226286/NCBR/14 within the “INNOTECH” program.

REFERENCES

- [1] Pater, Zbigniew. 2009. „Walcowanie poprzeczno-klinowe.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [2] Pater, Zbigniew. 2014. Cross-Wedge Rolling. W *Comprehensive Materials Processing*, 211–279. Elsevier Ltd.
- [3] Pater, Z., Tomczak, J., Bulzak, T. 2015. „Experimental study of rotary compression for hollow parts.” *Metalurgija* vol. 54 (2): 419–422.
- [4] Tomczak, J., Pater, Z., Bulzak, T. 2015. „Forming of Hollow Shaft Forging from Titanium Alloy Ti6Al4V by Means of Rotary Compression.” *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (1): 419–425.
- [5] Tomczak, J., Bulzak, T., Pater, Z. 2015. „The Effect of Billet Wall Thickness on the Rotary Compression Process for Hollow Parts.” *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 61 (3): 149–156.
- [6] Weroński, W., Gontarz, A., Pater, Z. 2007. „Wybrane zagadnienia z teorii i technologii kucia w prasie trójsuwakowej.” Lublin: Wyd. LTN.

- [7] Weroński, W.S., Gontarz, A., Pater, Z. 2006. „The research of forging process of eccentric part on three slide forging press.” *Journal of Materials Processing Technology* 177: 214–217.
- [8] Samołyk, G. 2012. „Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [9] Samołyk, G. 2012. „Podstawy teoretyczne i modelowanie prasowania obwiedniowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [10] Bartnicki, J. 2014. „Studium procesu przepychania obrotowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [11] Bartnicki, J., Pater, Z. 2005. „Walcowanie poprzeczno-klinowe wyrobów drążonych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [12] Bartnicki, J., Pater, Z. 2004. “The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts.” *Journal of Materials Processing Technology* 155–156: 1867–1873.
- [13] Pater, Z., Gontarz, A., Tomczak, J. 2011. „Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [14] Pater, Z. 2011. “Cross-wedge rolling of shafts with an eccentric step.” *Journal of Iron and Steel Research, International* 18 (6): 26–30.
- [15] Tofil, A., Pater, Z. 2009. „Dzielenie bezodpadowe metalowych prętów okrągłych.” Chełm: Wyd. PWSZ w Chełmie.
- [16] Tofil, A. 2011. „Bezodpadowe dzielenie prętów.” *Mechanik* 4: 308–313.
- [17] Tofil, A., Pater, Z., Tomczak, J. 2013. “Dwuwałcowa klatka walcownicza, zwłaszcza do walcowania poprzecznego, wzdłużnego oraz dzielenia bezodpadowego.” Patent RP nr 215512.
- [18] Pater, Z., Bogusz, E., Gontarz, A., Weroński, W. 2004. „Walcarka i narzędzie do wytwarzania wyrobów kształtowych, zwłaszcza śrubowych.” Patent RP nr 208033.
- [19] Pater, Z., Tomczak, J. 2012. „Walcowanie poprzeczno-klinowe kul.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [20] Pater, Z., Tomczak, J. 2013. „Rotary Compression of Hollow Parts by Cross Rolling.” EU Patent nr EP2422896.
- [21] Pater, Z., Tomczak, J. 2013. „Method for plastic forming of toothed shafts.” EU Patent nr EP2422898.
- [22] Tomczak, J., Pater, Z. 2013. „Apparatus for rotary compression of hollow parts.” EU Patent nr EP 2422897.
- [23] Tomczak, J., Pater, Z. 2011. „Walcarka ramowo-konsolowa, zwłaszcza do walcowania wzdłużnego wyrobów płaskich oraz kształtowych.” Zgłoszenie patentowe nr P-396594.
- [24] Bulzak, T., Tomczak, J., Pater, Z. 2014. „Forming a lever preform made of aluminium alloy 2014.” *Metalurgia* 53 (4): 505–508.
- [25] Pater, Z., Tomczak, J. 2012. „Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [7] Weroński, W.S., Gontarz, A., Pater, Z. 2006. „The research of forging process of eccentric part on three slide forging press.” *Journal of Materials Processing Technology* 177: 214–217.
- [8] Samołyk, G. 2012. „Wybrane zagadnienia technologii i teorii prasowania obwiedniowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [9] Samołyk, G. 2012. „Podstawy teoretyczne i modelowanie prasowania obwiedniowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [10] Bartnicki, J. 2014. „Studium procesu przepychania obrotowego.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [11] Bartnicki, J., Pater, Z. 2005. „Walcowanie poprzeczno-klinowe wyrobów drążonych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [12] Bartnicki, J., Pater, Z. 2004. “The aspects of stability in cross-wedge rolling processes of hollowed shafts.” *Journal of Materials Processing Technology* 155–156: 1867–1873.
- [13] Pater, Z., Gontarz, A., Tomczak, J. 2011. „Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek o kształtach złożonych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [14] Pater, Z. 2011. “Cross-wedge rolling of shafts with an eccentric step.” *Journal of Iron and Steel Research, International* 18 (6): 26–30.
- [15] Tofil, A., Pater, Z. 2009. „Dzielenie bezodpadowe metalowych prętów okrągłych.” Chełm: Wyd. PWSZ w Chełmie.
- [16] Tofil, A. 2011. „Bezodpadowe dzielenie prętów.” *Mechanik* 4: 308–313.
- [17] Tofil, A., Pater, Z., Tomczak, J. 2013. “Dwuwałcowa klatka walcownicza, zwłaszcza do walcowania poprzecznego, wzdłużnego oraz dzielenia bezodpadowego.” Patent RP nr 215512.
- [18] Pater, Z., Bogusz, E., Gontarz, A., Weroński, W. 2004. „Walcarka i narzędzie do wytwarzania wyrobów kształtowych, zwłaszcza śrubowych.” Patent RP nr 208033.
- [19] Pater, Z., Tomczak, J. 2012. „Walcowanie poprzeczno-klinowe kul.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [20] Pater, Z., Tomczak, J. 2013. „Rotary Compression of Hollow Parts by Cross Rolling.” EU Patent nr EP2422896.
- [21] Pater, Z., Tomczak, J. 2013. „Method for plastic forming of toothed shafts.” EU Patent nr EP2422898.
- [22] Tomczak, J., Pater, Z. 2013. „Apparatus for rotary compression of hollow parts.” EU Patent nr EP 2422897.
- [23] Tomczak, J., Pater, Z. 2011. „Walcarka ramowo-konsolowa, zwłaszcza do walcowania wzdłużnego wyrobów płaskich oraz kształtowych.” Zgłoszenie patentowe nr P-396594.
- [24] Bulzak, T., Tomczak, J., Pater, Z. 2014. „Forming a lever preform made of aluminium alloy 2014.” *Metalurgia* 53 (4): 505–508.
- [25] Pater, Z., Tomczak, J. 2012. „Walcowanie śrubowe kul do młynów kulowych.” Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej.

- [26] Tomczak, J., Pater, Z., Bartnicki, J. 2013. "Skew rolling of balls in multiple helical impressions." *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (4): 1072-1076.
- [27] Pater, Z., Tomczak, J., Bartnicki, J., Lovell, M.R., Menezes, P.L. 2013. "Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 67: 1-7.
- [28] Pater, Z., Tofil, A. 2013. „Analiza procesu walcowania śrubowo-klinowego odkuwki korpusu noża obrotowego." *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 10: 692-696.
- [29] Pater, Z. 2014. „Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a work holding bolt." *Metalurgija* 53 (4): 653-656.
- [30] Pater, Z. 2014. "Analysis of the Helical-Wedge Rolling Process for Producing a Long Stepped Shaft." *Key Engineering Materials* 622-623: 893-89.
- [26] Tomczak, J., Pater, Z., Bartnicki, J. 2013. "Skew rolling of balls in multiple helical impressions." *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (4): 1072-1076.
- [27] Pater, Z., Tomczak, J., Bartnicki, J., Lovell, M.R., Menezes, P.L. 2013. "Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 67: 1-7.
- [28] Pater, Z., Tofil, A. 2013. „Analiza procesu walcowania śrubowo-klinowego odkuwki korpusu noża obrotowego." *Hutnik – Wiadomości Hutnicze* 10: 692-696.
- [29] Pater, Z. 2014. „Analysis of the helical-wedge rolling process for producing a work holding bolt." *Metalurgija* 53 (4): 653-656.
- [30] Pater, Z. 2014. "Analysis of the Helical-Wedge Rolling Process for Producing a Long Stepped Shaft." *Key Engineering Materials* 622-623: 893-89.

