

Dr hab. inż. Krzysztof ŁUKASIK
Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin

Modelowanie numeryczne procesu wytwarzania lekkich elementów rurowych z przewężeniami na końcach

Computer modeling of a production process for light tubular parts with necked ends

Streszczenie

Wytwarzanie jednolitych drążonych elementów rurowych z wytrzymałych lekkich stopów aluminium wymaga stosowania specjalnych metod kształtowania. Znaczny stopień odkształcenia konieczny do ukształtowania zakończenia ciągną wymaga cieplnego wspomaganie procesu obróbki. Działanie ciepła powoduje zmiany strukturalne w odkształcanym materiale. Niewielkie odkształcenia plastyczne w strefie przejściowej w połączeniu z działaniem podwyższonej temperatury prowadzą do powstania strefy o niekorzystnych właściwościach mechanicznych. Konstrukcja elementów i przyjęty sposób kształtowania nie eliminują powstawania tej strefy. Jednak poprzez sterowanie parametrami procesu możliwe jest wpływanie na jej położenie.

Abstract

The production of uniform hollow tubular parts made from light aluminum alloys requires application of special forming methods. In order to obtain a considerable degree of deformation which is necessary for forming push pull rod ends, the working process has to be thermally supported. The heat causes structural changes in the deformed material. Small plastic deformations occurring in the transition zone when combined with increased temperature lead to creation of a zone with unfavorable mechanical properties. Neither the construction of elements nor the adopted forming method eliminates the occurrence of the zone. However, it is possible to affect its position by controlling the process parameters.

Słowa kluczowe: ciągną rurowe, mikrostruktura strefy przejściowej, modelowanie numeryczne

Key words: push pull rods, microstructure of transition zone, computer modeling

1. WPROWADZENIE

Bez cieplnego wspomaganie trudno wyobrazić sobie realizację wielu procesów obróbki plastycznej. Najczęściej dotyczy to obróbki na ciepło, lub gorąco i związane jest z nagrzewaniem całej objętości materiału wsadowego wykonanego ze stopów aluminium. Znacznie rzadziej wykorzystywane jest miejscowe oddziaływanie ciepła celem lokalnej zmiany charakterystyki materiałowej. Poza zmniejszeniem zużycia energii wymaganej do kształtowania wyrobu taki sposób kształtowania pozwala także na zwiększenie efektywności obróbki.

1. INTRODUCTION

A great number of metal machining processes could not be conducted without thermal support. It mostly concerns warm or hot working processes in which the whole volume of the starting stock made from aluminum alloys is heated. Changing material properties by means of applying heat locally is more seldom used. Not only does such forming method allow for a decrease in the energy amount necessary for product formation, but it also makes the working process more efficient.

W wielu przypadkach nagrzewanie odbywa się w czasie obróbki i obejmuje tylko odkształcany fragment materiału. Lokalizacja strefy gorącej w ograniczonej tylko do obszaru odkształcanego zwiększa zakres stosowalności procesu. Jednakże zalety tak realizowanych procesów nie zawsze mogą być wykorzystane. W wielu przypadkach na przeszkodzie stoją trudne do kontrolowania zjawiska występujące w strefie przejściowej pomiędzy obszarem gorącym i zimnym.

Metodą obróbki z podgrzewaniem tylko obszaru odkształcanego wytwarza się dla przemysłu lotniczego części z drażonych elementów rurowych oraz z wytrzymałych stopów lekkich. Wyroby te niejednokrotnie muszą charakteryzować się poza wysoką wytrzymałością doraźną także wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Łączone są z innymi częściami za pomocą odpowiednio ukształtowanych końcówek. Wykonywane mogą być one na wiele sposobów, ale zazwyczaj wytwarzane są jako elementy jednolite, z zasady trwalsze i bardziej niezawodne. Kształtowanie takich wyrobów wymaga skumulowania stosunkowo dużej objętości materiału na ich końcach. Materiał ten pochodzi z cienkościennego wsadu rurowego. Konieczne jest zatem spęczanie stosunkowo długiej jego części przy znacznym stopniu odkształcenia. Ogranicza to możliwość zastosowania obróbki na zimno [1, 2, 3].

Na rys.1 przedstawiono końcówkę zakończenia cięgna rurowego. Przedstawiony element wykonany jest z rury duralowej 2024T3 o średnicy zewnętrznej $d_z = \phi 30$ mm i grubości ścianki 1,5 mm. Jego częścią jest obszar przejściowy – P pomiędzy częścią cylindryczną i stożkową pokazany na rys. 2.

This is true of such processes as heated collar pressing, electro-upsetting or thick part bending. In many cases, heating is done during the working process and it is applied only to the material area to be deformed. Given that the hot zone is limited to the deformation area only, the process applicability can be extended. Nevertheless, the advantages of processes conducted in this way cannot always be used. One of the reasons for that is the fact that in many cases phenomena occurring in the transition zone between the hot and cold areas are difficult to control.

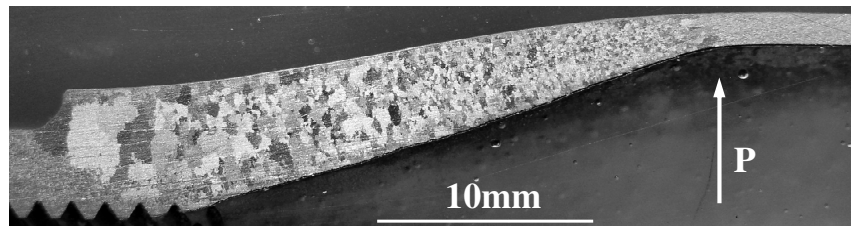
The working method which involves heating the deformation area only is applied in aerospace industry to produce parts made from hollow tubular elements as well as from strong light alloys. Apart from their strength properties, such parts must also have high fatigue strength. These products are connected with other elements by means of specially shaped ends. Despite a great number of existing production methods, they are usually produced as uniform elements, which makes them more durable and reliable. The forming of such parts requires that a considerable material volume be accumulated at their ends. Since the material is obtained from thin-walled tubular charge, it is necessary to upset its considerable length with a significant deformation degree, which means that application of cold working is limited [1, 2, 3].

Figure 1 presents a push pull rod end. The element is made from a duralumin 2024T3 tube with external diameter $d_z = \phi 30$ mm and wall-thickness of 1.5 mm. The transition zone P is located between the cylindrical and conical part as shown in Figure 2.



Rys. 1. Zakończenie cięgna rurowego

Fig. 1. Push pull rod end



Rys. 2. Struktura odkształconej końcówki cięgna z zaznaczonym miejscem pęknięcia zmęczeniowego - P.
Trawiono odczynnikiem Kellera

Fig. 2. Structure of a deformed push pull rod end with the place where fatigue cracking (P) occurs.
Etched with Keller's reagent

Cięgna podczas pracy podlegają zmiennym obciążeniom mechanicznym, które mogą prowadzić do ich uszkodzeń zmęczeniowych. Do uszkodzeń o tym charakterze dochodzi w ściśle określonym miejscu na granicy przejścia części rurowej o stałej średnicy w część przewężoną (P) – rys. 2.

Struktura w pobliżu powierzchni obszaru przejściowego - P wykazuje cechy charakterystyczne dla struktury przejściowej (gruboziarnista, drobnoziarnista) i jest wynikiem warunków występujących podczas odkształcania wyrobu. Schemat procesu wytwarzania pokazano na rys. 3 [4, 6].

Kształtowanie końcówek cięgien według tego schematu polega na powolnym przepychaniu zimnego wsadu rurowego przez gorącą matrycę 3 za pomocą stempla 1. Na skutek kontaktu z gorącym narzędziem koniec rury nagrzewa się. Pozwala to na jego odkształcanie. Po ukształtowaniu stożka przejściowego, stempel 1 kształtuje materiał do momentu uzyskania wymaganej długości części przewężonej. Staje się ona półfabrykatem kolejnego zabiegu. Podczas tego zabiegu stempel 2 przesuwa się w kierunku przeciwnym do stempla 1 i kształtuje końcówkę cięgna. W końcowej fazie procesu wyrób zostaje wypchnięty z narzędzi.

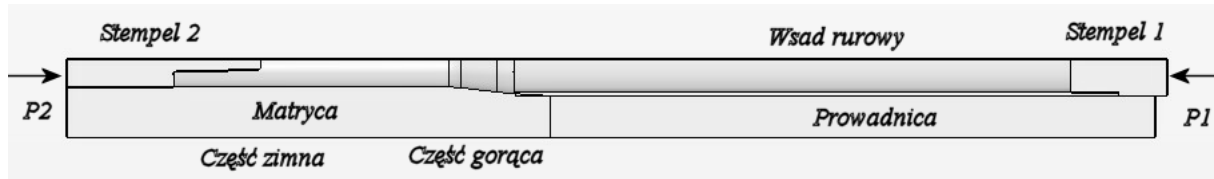
Geometria narzędzi i sposób przemieszczania materiału powoduje, że powstaje strefa przejściowa pomiędzy częścią odkształconą i nieodkształconą. Mikrostruktura przedstawiona na zglądzie wzdłużnym cięgna (rys. 4) uwiadcza ciemniejszy pas z wyraźną granicą, w stosunku do niezmiennego strukturalnie materiału (rys. 4b).

When in operation, push pull rods undergo variable mechanical load, which may lead to their fatigue damages. Such damages occur in one specific place located in the area where the constant diameter tubular part changes into the necked part (P) – see Fig. 2.

The structure in the vicinity of the transition zone P shows characteristics typical of a transition structure (it is coarse- and fine-grained) and results from the outcome of conditions occurring during the product deformation process. A scheme of the production process is illustrated in Figure 3 [4, 6].

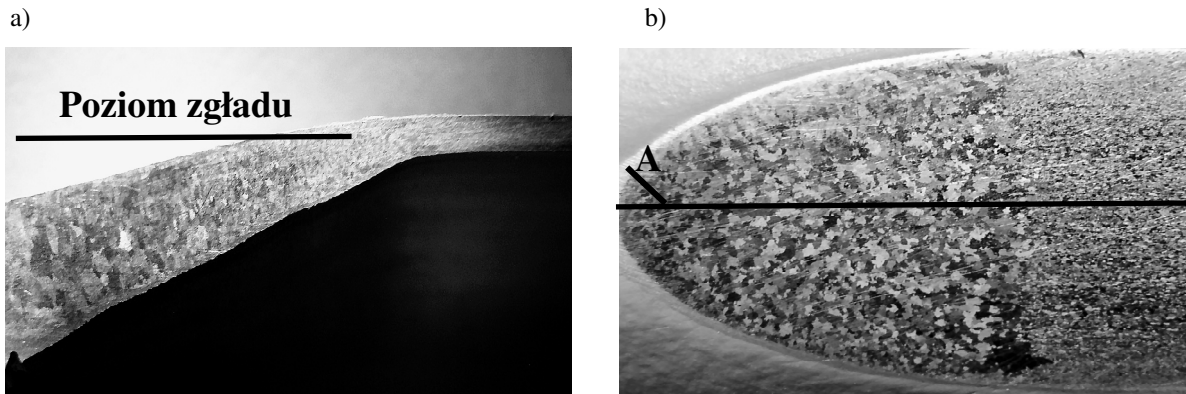
According to the scheme, the formation process for push pull rod ends consists in forcing the cold tubular charge through the hot die 3 with the punch 1. As a result of contact with the hot tool, the tube end becomes heated, which allows for its deformation. Once a transitory cone is formed, the punch 1 shapes the material until the required length of the necked part is obtained. This part is then worked in another operation in which the punch 2 moves in the opposite direction to the punch 1 and forms the push pull rod end. In the final phase of the process, the product is ejected from the tools.

Owing to the tool geometry and manner in which the material shifts, the transition zone between the deformed and non-deformed part occurs. The microstructure shown in the longitudinal polished section of the push pull rod (Fig. 4) shows a darker area with a clear boundary when compared to the material whose structure has not been changed (Fig. 4b).



Rys. 3. Schemat procesu kształtowania końcówki ciągną rurowego

Fig. 3. Scheme of the push pull rod end forming process



Rys. 4. Struktura przekroju wzdłużnego ciągną (a) i miejsca wzdłuż powierzchni przejścia w część cylindryczną ciągną (b); A – linia pomiaru twardości na powierzchni zglądu przejścia

Fig. 4. Structure of the push pull rod longitudinal section (a) and areas where the push pull rod becomes cylindrical (b); A is the hardness measurement line on the polished section surface

Warunki kształtowania wpływają na kinetykę rekrytalizacji i zdrowienia, których skutki łatwo przewidzieć. Rozkład twardości wzdłuż linii A przedstawiono na rys. 5.

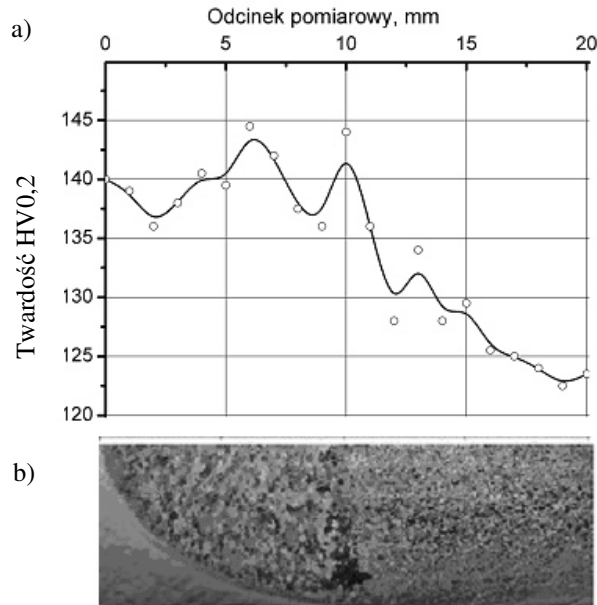
W pracy [5] wskazano także na głębsze związki pomiędzy warunkami procesu technologicznego a wskaźnikami jakościowymi i właściwościami mechanicznymi obrabianego materiału. Dowodzi to konieczności zwrócenia uwagi na całokształt zagadnienia związanego z kształtowaniem ciągną i poszukiwanie sposobów przeciwdziałania niekorzystnym zmianom.

Gruboziarnista struktura odkształconej części zakończenia gwintowanego (rys. 5b) nie wpływa istotnie na właściwości wyrobu. Zmieniając warunki realizacji procesu technologicznego można sterować odkształcaniem materiału i uzyskać zmianę geometrii wyrobu. Szczególnie istotne jest to w przypadku swobodnie kształtowanej wewnętrznej powierzchni ciągną rurowego. Brak możliwości wprowadzenia do wnętrza kształtowanego elementu narzędzi powoduje, że tylko technologia kształtowania musi zapewnić właściwą geometrię wyrobu.

The forming conditions affect recrystallization and recovery kinetics, the results of which are easy to predict. The hardness distribution along the line A is illustrated in Figure 5.

The work [5] presents a detailed description of connections between the technological process conditions and quality factors as well as mechanical properties of the formed material. It seems necessary then to focus on the problem concerning push pull rod forming and to search for ways of preventing undesired changes.

The coarse-grained structure of the deformed part of the threaded end (Fig. 5b) does not significantly affect product properties. By changing the technological process conditions it is possible to control material deformation as well as to change the product geometry. It is especially important in the case of open die forming of the push pull rod internal surface. The impossibility of inserting the tools into the element being formed means that the correct product geometry can only be shaped by means of the forming technology.



Rys. 5. Rozkład twardości w miejscu wzdłuż powierzchni zglądu i na przejściu w część cylindryczną ciągną i wzdłuż linii A (rys. 4b) (a); struktura zakończenia gwintowanego ciągną rurowego (b)

Fig. 5. Hardness distribution along the polished section surface, in the area where the push pull rod becomes cylindrical, and along the line A (Fig. 4b) (a); structure of the threaded push pull rod end (b)

Istotne korzyści przy określaniu wpływu poszczególnych czynników można uzyskać wykorzystując modelowanie komputerowe. Umożliwia to weryfikację założeń wstępnych i prognozowanie wyników, które w realnych warunkach są trudne, lub niemożliwe do przewidzenia.

2. MODELOWANIE PROCESU

Zgodnie z podanym schematem założono wykonanie końcówki ciągną w dwóch operacjach [6]. W pierwszej poprzez przepychanie wykonano przewężenie wsadu i nadano mu zewnętrzny kształt. W drugiej operacji poprzez spęczanie wykonano wewnętrzny zarys zakończenia ciągną. Zasadniczym zabiegiem jest operacja spęczania polegająca na zwiększeniu grubości ścianki pod gwint oraz ukształtowaniu ścianki w części przejściowej ciągną. Symulację numeryczną procesu kształtowania końcówki ciągną rurowego wykonano w programie Deform 3D V6.1. Założono wymianę ciepła materiału kształtowanego z narzędziami przez kontakt, pominięto wymianę ciepła wsadu z otoczeniem z uwagi na zamknięty charakter przebiegu procesu.

The application of computer modeling to examine the effect of individual factors can be of a great advantage here. Owing to computer modeling, it is possible to verify preliminary assumptions and to predict final results which are difficult, if not impossible, to predict in real conditions.

2. PROCESS MODELING

According to the given scheme, the push pull rod end is to be produced in two operations [6]. In the first operation, necking is formed on the charge as a result of forcing the material through and its outer shape is formed. In the second operation, the internal profile of the push pull rod end is done in upsetting. Upsetting is of vital importance for the operation as it increases wall-thickness of the thread to be formed and forms the wall in the transition zone of the push pull rod. The numerical simulation of the forming process for the push pull rod end has been made with the Deform 3D V6.1 programme. It has been assumed that heat exchange resulting from the contact between the formed material and the tools occurs, while the problem of heat

Stosowano model materiałowy stopu 2024 opracowany przez autora w pracy [5].

Badano wpływ warunków kształtowania: współczynnik tarcia μ od 0,08 do 0,4, prędkości ruchu stempli v_s od 1 do 75 mm/s, oraz różne warunki cieplne części gorącej i zimnej końcówki cięgna [6].

Analizę numeryczną przeprowadzono przyjmując schemat procesu podany na rys. 3. Podczas pierwszego etapu kształtowania rura wpychana jest do matrycy przewężającej przez stempel P1 z prędkością $v_s = 1$ mm/s. Po wstępnym nagraniu się rury od ścianek matrycy zwiększano prędkość przesuwu stempla do 25 mm/s. Przyjęto stałą temperaturę części matrycy gorącej $T_G = 450$ °C, zmieniano temperaturę części matrycy zimnej T_C od 200 °C do 360 °C i temperaturę prowadnicy T_P od 20 °C do 360 °C.

Po wykonaniu odpowiednio długiego przewężenia stempel P1 zostaje zatrzymany, a uruchomiony zostaje stempel P2. Spęczanie końcówki pod gwint następuje przy prędkości stempla P2 (v_s) od 10 mm/s do 75 mm/s, przy zróżnicowanej temperaturze części zimnej matrycy (T_C) i prowadnicy (T_P).

Wpływ temperatury i prędkości kształtowania jest istotny zarówno z uwagi na możliwość przeprowadzenia samego procesu, jak i dla osiągnięcia ostatecznego kształtu cięgna w strefie przejściowej (rys.6 i 7).

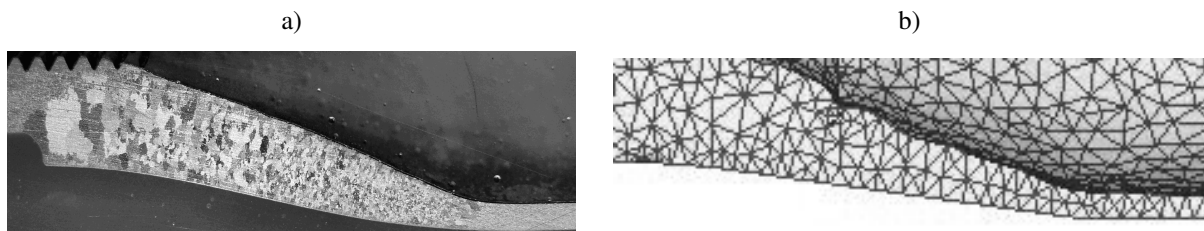
exchange between the charge and its environment has been omitted due to the closed nature of the conducted process. The used material model made from the 2024 alloy has been developed by the author in the work [5].

The examined forming conditions have included the following: the friction coefficient μ ranging from 0.08 to 0.4, the punch velocity v_s ranging from 1 to 75 mm/s, and different thermal conditions of both the hot and cold part of the push pull rod end [6].

The numerical analysis has been made in accordance with the scheme illustrated in Figure 3. During the first phase of the forming process, the punch P1 pushes the charge into the necking die with the velocity $v_s = 1$ mm/s. After the charge has been preheated due to the contact with the die walls, the punch shift velocity is increased to the value of 25 mm/s. The temperature of the hot die part T_G is assumed to be constant and has the value of $= 450$ °C, the temperature of the cold die part T_C is increased from 200 °C to 360 °C, while the guide temperature T_P is increased from 20 °C to 360 °C.

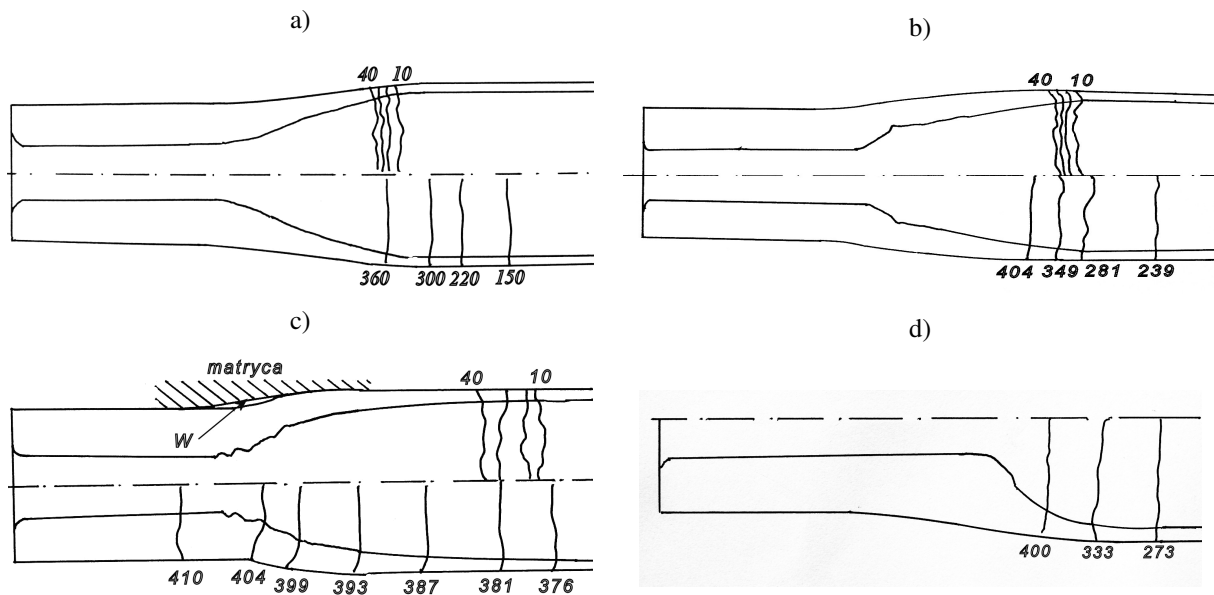
Once a necking which long enough has been made, the punch P1 is stopped, and the punch P2 is started. The upsetting of a thread end is done with the punch P2 whose velocity v_s ranges from 10 mm/s to 75 mm/s, at differing temperature of both the cold part of the die (T_C) and the guide (T_P).

The effect of both the temperature and forming velocity is significant due to the fact that it makes the process possible and allows for obtaining the final shape of the push pull rod in the transition zone (Figs. 6 and 7).



Rys. 6. Struktura końcówki cięgna w strefie przejściowej (a) oraz wg symulacji komputerowej (b)

Fig. 6. Structure of the push pull rod end in the transition zone (a) and after the conducted computer simulation (b)



Rys. 7. Rozkład temperatury i odkształceń oraz kształt końcówek cięgna rurowego przy różnych warunkach kształtowania:

a) $T_G - 400 \div 420 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 300 \div 350 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 20 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,15 \div 0,3\%$, $v_s (P_2) - 10 \div 25 \text{ mm/s}$;

b) $T_G - 420 \div 450 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 250 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 100 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,08 \div 0,25\%$, $v_s (P_2) - 15 \div 30 \text{ mm/s}$;

c) $T_G - 400 \div 450 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 300 \div 360 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 360 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,08 \div 0,15\%$, $v_s (P_2) - 15 \div 25 \text{ mm/s}$;

d) $T_G - 420 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 380 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,3 \div 0,4\%$, $v_s (P_2) - 50 \div 75 \text{ mm/s}$;

gdzie: T_G - temperatura części matrycy gorącej, T_C - temperatura części matrycy zimnej, T_P - temperatura prowadnicy, μ - współczynnik tarcia, $v_s (P_2)$ - prędkość stempla P_2

Fig. 7. Temperature and deformation distribution and the shape of the push pull rod ends obtained at different forming conditions:

a) $T_G - 400 \div 420 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 300 \div 350 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 20 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,15 \div 0,3\%$, $v_s (P_2) - 10 \div 25 \text{ mm/s}$;

b) $T_G - 420 \div 450 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 250 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 100 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,08 \div 0,25\%$, $v_s (P_2) - 15 \div 30 \text{ mm/s}$;

c) $T_G - 400 \div 450 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 300 \div 360 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 360 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,08 \div 0,15\%$, $v_s (P_2) - 15 \div 25 \text{ mm/s}$;

d) $T_G - 420 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_C - 380 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_P - 150 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\mu - 0,3 \div 0,4\%$, $v_s (P_2) - 50 \div 75 \text{ mm/s}$;

where: T_G - temperature of the hot die part, T_C - temperature of the cold die part, T_P - guide temperature, μ - friction coefficient, $v_s (P_2)$ - velocity of the punch P_2

Warunki realizacji procesu określone na rys. 7a pozwalają na uzyskanie wyrobu o właściwościach typowych i mikrostrukturze przedstawionej na rys. 6a.

Przyjęcie wstępne niskiej wartości współczynnika tarcia $\mu < 0,2$ przy małej prędkości stempla spęczającego (P_2) $v_s < 15 \text{ mm/s}$ przy $T_C = 250 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ prowadzi do uzyskania dłuższej części przejściowej, przy zmniejszeniu przekroju materiału w części przeznaczony pod gwint. Odwrotny skutek przynosi zwiększenie współczynnika tarcia μ i temperatury T_C . Jednak żadna z tych zmian nie prowadzi do bezpośredniego uzyskania optymalnego kształtu strefy przejściowej.

The process conditions presented in Figure 7a allow for obtaining a product of typical properties and of the microstructure shown in Figure 6a.

The assumption of a low value of the friction coefficient $\mu < 0,2$ at low velocity of the upsetting punch (P_2) $v_s < 15 \text{ mm/s}$ with $T_C = 250 \div 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ results in obtaining a longer transition zone and a decreased material intersection in the area where the thread is to be formed. An increase in the value of the friction coefficient μ and in the temperature T_C has the opposite effect. None of those changes, however, leads directly to obtaining an optimal shape of the transition zone.

Obniżenie temperatury części matrycy zimnej - T_C (części rozdzielone – skokowa zmiana temperatury), może spowodować pojawienie uskoku po stronie wewnętrznej wyrobu (rys. 7b). Obserwuje się natomiast korzystne zwiększenie przekroju materiału od strony części cylindrycznej, szczególnie przy zastosowaniu prowadnicy nagrzanej do podwyższonej temperatury (300-350 °C) - rys. 7c. Prowadzi to do oddalenia strefy zgniotu krytycznego od końca ciągną, zwiększając korzystny efekt procesu, mimo, że strefa małych odkształceń jest poddawana działaniu wyższej temperatury. Jednak z uwagi na zmianę kąta płynięcia (spowodowanej wzrostem średnicy) i odległość od stempla spęczającego P2 efektywność takiego sposobu kształtowania jest nieznaczna. Ponadto proces podatny jest na tworzenie się pustej przestrzeni między materiałem i matrycą (W) - rys.7c. Konieczne jest także zwiększenie długości wsadu, co nieznacznie zwiększa masę wyrobu.

Przy zwiększeniu prędkości spęczania i przy zachowaniu pozostałych warunków obserwuje się tendencję do niekorzystnej zmiany grubości materiału w obszarze przejścia części stożkowej w ściankę cylindryczną. Tworzy się w tym przypadku uskok, pogłębiający działanie wewnętrznego karbu geometrycznego w punkcie (P) - rys. 2, a przy wysokiej wartości współczynnika tarcia $\mu \geq 0,4$ powstaje charakterystyczna strefa sferyczna (rys. 7d).

Porównanie warunków cieplnych i wielkości odkształceń w końcowej fazie kształtowania dowodzi możliwości sterowania położeniem strefy przejściowej przez zmianę warunków kształtowania. Nie jest to jednak proces o dużej efektywności.

3. PODSUMOWANIE

1. Przeprowadzone symulacje procesu kształtowania końcówek ciągnien rurowych wg nowego procesu kształtowania wykazały, że na kształtowanie strefy przejściowej zasadniczy wpływ ma stan odkształcenia i współistniejący z nim stan cieplny materiału (rozkład temperatury, czas procesu).

A decrease in the cold die part temperature T_C (separation of the parts causes an abrupt temperature change) may cause that a fault will occur on the internal part of the product (Fig. 7b). Nonetheless, a favourable increase in the material intersection is to be observed on the cylindrical part, especially if a guide heated up to a temperature of 300-350 °C is used – see Fig. 7c. In effect, the critical deformation zone is moved away from the push pull rod end, which increases the advantageous effect of the process, even though a small deformation area is exposed to a higher temperature. Given the flow angle change (caused by an increase in diameter) and the distance from the upsetting punch P2, it needs however be observed that the effectiveness of such forming process is limited. What is more, an empty space between the material and the die (W) may occur during the process – see Fig. 7c. It is also necessary to increase the charge length, which slightly increases the product weight.

When the upsetting velocity is increased and the other conditions are retained, an unfavourable change in the material thickness occurs in the transition zone where the conical part changes into the cylindrical wall. As a result, a fault is formed which enhances the effect of an internal geometric notch located at the point P – see Fig. 2, and with a high value of the friction coefficient $\mu \geq 0,4$ a characteristic spherical zone occurs (Fig. 7d). The comparison of thermal conditions and deformation rate in the final phase of the forming process proves a possibility of controlling the location of the transition zone through introducing changes in the forming conditions. However, the process is not remarkably effective.

3. CONCLUSIONS

1. The conducted simulations of the process for forming push pull rod ends with a new forming method have proven that the shaping of the transition zone is largely dependent on the state of strain and coexistent thermal conditions of the material (temperature distribution, process duration).

2. Zastosowanie przedstawionego procesu kształtowania końcówek cięgna rurowego związane jest zawsze z występowaniem strefy przejściowej w ciągnięciu o niekorzystnych właściwościach mechanicznych.
 3. Poprawa właściwości wyrobu przez zmianę warunków realizacji procesu, głównie przez przemieszczenie strefy przejściowej w ciągnięciu pozwala na uzyskanie poprawy jakości cięgna, chociaż jest to poprawa w ograniczonym stopniu.
 4. Efektywną zmianę charakterystyki użytkowej końcówek cięgna można uzyskać jedynie przez obróbkę dopełniającą.
 5. Kierunki proponowanych zmian będące przedmiotem dalszych badań wskazują na możliwość skutecznego przeciwdziałania niekorzystnym efektom procesu kształtowania końcówek cięgna rurowego według przedstawionego schematu. Wymagają one jednak zmian w konstrukcji narzędzi i doboru odpowiednich warunków procesu.
2. As a result of applying the presented process for forming push pull rod ends is the transition zone always occurs in the push pull rod whose mechanical properties are not favourable.
 3. Improving the product properties through introducing changes in the process conditions, in particular by shifting the transition zone in the push pull rod, allows for improving the push pull rod quality, yet that quality improvement is not significant.
 4. An effective change in the functional quality of push pull rod ends may only be obtained from complementary machining processes.
 5. The suggested changes which are to be the subject of further research indicate a possibility of counteracting unfavourable effects occurring in the presented forming process for push pull rods ends. They require, however, introducing some changes in the tool construction as well as adopting suitable process conditions.

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.

The research has been made as part of Project No. POIG.01.01.02-00-015/08-00 titled "Modern Material Technologies in Aerospace Industry" under the Innovative Economy Operational Programme (IE OP). The research project has been co-financed by the European Union from the funds of the European Regional Development Fund.

LITERATURA/REFERENCES

1. Ziółkiewicz S., Czartoryska I., Gronowski W.: Badania procesu redukcji średnicy końca rury metodą obciskania. *Obróbka Plastyczna Metali* 2008 t. XIX nr 1 s. 21-27.
2. Czartoryski B.: Gniazdo produkcyjne obciskania rur. Określenie dopuszczalnego stopnia przeformowania rury gorąco walcowanej przy obciskaniu. *Obróbka Plastyczna Metali*. 2007 t. XVIII nr 2 s. 3-7.
3. Chałupczak J., Thomas P.: Wpływ kąta roboczej części narzędzia, rodzaju materiału i względnych grubości rury na wybrane parametry procesu obciskania zwężek rurowych. *Rudy i Metale* 2000 nr 10-11 s. 556-559.
4. Opis patentowy PL94453. Sposób oraz urządzenie do wykonywania rur cienkościennych z pogrubionymi na końcach ściankami.
5. Gontarz A., Weroński W.: Kucie stopów aluminium. Aspekty technologiczne i teoretyczne procesu. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001, s. 278.
6. Projekt Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 pt. „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”.