

Mgr inż. Sylwia BEDNAREK, dr hab. inż. Jan SIŃCZAK, prof. AGH
dr inż. Aneta ŁUKASZEK-SOŁEK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków

Wpływ smukłości materiału wyjściowego na parametry procesu kucia stopu tytanu - - fizyczne i numeryczne modelowanie procesu

*Influence of height/diameter ratio of forging stock
for variables of forging process of titanium alloy -
- physical and numerical modelling*

Streszczenie

Przeanalizowano proces kucia odkuwki z dwufazowego stopu tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr, charakteryzującej się dużym stosunkiem powierzchni do objętości. Obliczenia wykonano przy założeniu stałej prędkości suwaka prasy, stałej temperatury materiału wyjściowego i narzędzi oraz tarcia. Zmiennym parametrem w obliczeniach była smukłość materiału wyjściowego. Ustalono najkorzystniejszą smukłość materiału wyjściowego zapewniającą zwiększenie równomierności odkształcenia w objętości odkuwki oraz minimalizację siły kształtowania. Otrzymane wyniki analizy numerycznej i fizycznej wykonanej na modelu z plasteliny mogą stanowić podstawę do określenia parametrów procesu kształtowania w warunkach przemysłowych wyrobów ze stopów tytanu czułych na prędkość odkształcenia.

Abstract

Forging process of parts with high surface/volume ratio made of two-phase titanium alloy Ti-6Al-2Mo-2Cr was analysed. In numerical modelling assumes constant tool velocity, stock forging and tools temperature and friction conditions. Variable parameter in calculations was height/diameter ratio of stock forging. Most favourable height/diameter ratio of stock forging in order to obtain uniform strain distribution and minimization pressure load was determined. The results of numerical and physical analysis might be the base for definition forging process in industrial for products in titanium alloys witch are sensitive to strain rate.

Słowa kluczowe: stop Ti-6Al-2Mo-2Cr, kucie izotermiczne, modelowanie numeryczne

Key words: Ti-6Al-2Mo-2Cr, isothermal forging process, numerical modelling

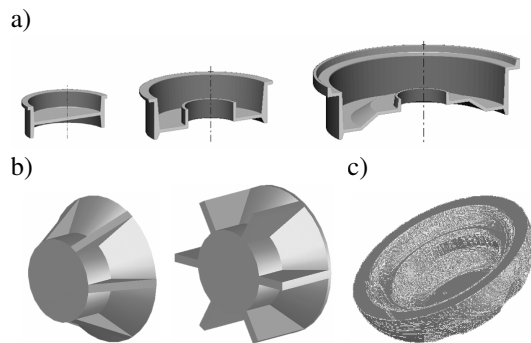
1. WPROWADZENIE

W przemyśle samochodowym, chemicznym, lotniczym oraz inżynierii morskiej obserwuje się tendencje zastępowania materiałów konwencjonalnych materiałami lżejszymi, w tym stopami tytanu, przy zapewnieniu wymaganych własności wytrzymałościowych [1, 2]. Niektóre stopy tytanu znajdują zastosowanie jako substytuty stopów żelaza i miedzi. Dotyczy to nie tylko części pojazdów, lecz również różnych odpowiedzialnych części konstrukcyjnych. Naj-

większą popularnością wśród stopów tytanu cieszą się stopy dwufazowe [3, 4]. Ich właściwości zależą od rodzaju i udziału pierwiastków stopowych oraz zanieczyszczeń, a także od właściwości i ilości poszczególnych faz. Wykazują one dużą wytrzymałość względną, wysoką odporność na korozję i mogą pracować w podwyższonych temperaturach. To sprawia, że stopy komercyjne dwufazowe mają obecnie najszersze perspektywy zastosowania.

Przykłady odkuwek wykonywanych ze stopów tytanu pokazano na rysunku 1. Odkuwki felg kół samolotów i z żebrami charakteryzują

się zmiennym przekrojem poprzecznym i małą grubością ścianek przy jednocześnie dużej powierzchni. Tego typu odkuwki wykonuje się w złożonym procesie wyciskania promieniowego z uprzednim spęczaniem. Odkuwka kołpaka (rys. 1c), prócz spęczania i wyciskania promieniowego, w końcowym stadium procesu po uzyskaniu denka o małej grubości podlega procesowi dziurowania. Odkuwki z cienką powłoką w strefie osiowej pod czołową powierzchnią stempla uzyskuje się przy dużym przemieszczeniu metalu w kierunku promieniowym, czego konsekwencją są duże obciążenia narzędzi w strefie osiowej odkuwki w ostatnim etapie procesu kucia oraz naprężenia rozciągające w bocznej strefie odkształcanego materiału. Otrzymanie wyrobów o żądanych właściwościach ze stopów tytanu dla tych kształtów, umożliwiają badania modelowe procesu kucia, uwzględniające badania rozkładu temperatury, intensywności odkształcenia i intensywności prędkości odkształcenia oraz badania naprężeń średnich.



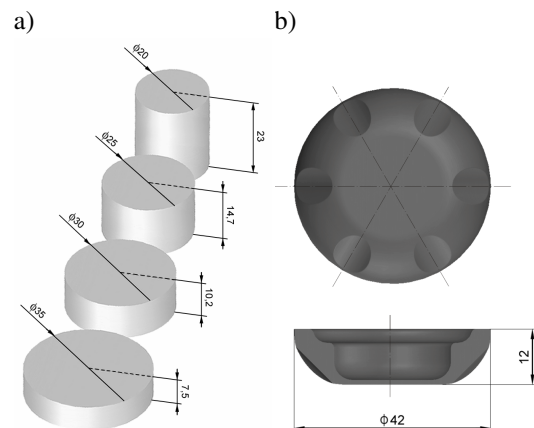
Rys. 1. Odkuwki wykonywane ze stopów tytanu:
a) felgi kół samolotów [5], b) z żebrami usztywniającymi,
c) kołpak [6]

Fig. 1. Forging made of titanium alloys:
a) aircraft wheels [5], b) forging with stiffening ribs,
c) hub cover [6]

2. MODELOWANIE PROCESU KUCIA ODKUWEK ZE STOPÓW TYTANU

Analizowana odkuwka kołpaka charakteryzuje się dużym skupieniem masy w części zewnętrznej i niewielkim w części środkowej. Odkuwkę wykonuje się w jednym zabiegu, z materiału wyjściowego w postaci walca. Wymiary materiału wyjściowego przyjętego do

modelowania oraz podstawowe wymiary odkuwki kołpaka pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Podstawowe wymiary materiału wyjściowego (a) i odkuwki kołpaka (b)

Fig. 2. Basic dimensions of forging stock (a) and hub cover forging (b)

Wykonanie odkuwki o kształcie przedstawionym na rysunku 2b wymaga dużego przemieszczenia materiału na zewnątrz w kierunku promieniowym, prostopadłym do ruchu narzędzia. Pierwszy etap procesu kucia polega na swobodnym spęczaniu. W drugim etapie kształtowania materiał płynie w otwartą część wykroju matrycy o dużej objętości aż do chwili zetknięcia się z czołem stempla o większej średnicy. W pierwszym etapie procesu kucia występują naprężenia ściskające, w drugim natomiast występują naprężenia rozciągające. W przypadku kucia materiałów mało plastycznych, może nastąpić pęknięcie materiału w warstwach, które nie stykają się z narzędziami. Zachodzi więc konieczność oceny zachowania się materiału w tym etapie kucia analizowanej odkuwki, który decyduje o jej poprawnym wykonaniu. Modelowanie procesu kucia odkuwki kołpaka wykonano dwoma metodami. Modelowanie numeryczne służyło do oceny rozkładu odkształceń i naprężeń średnich w kolejnych etapach kształtowania odkuwki. Modelowanie fizyczne na modelu z plasteliny służyło do oceny rzeczywistego rozkładu odkształceń.

W ostatnim etapie procesu kucia występuje trójosiowy stan naprężeń ściskających, w wyniku całkowitego wypełnienia wykroju.

2.1. Modelowanie numeryczne

Stop tytanu Ti-6Al-2Mo-2Cr, którego skład chemiczny podano w tablicy 1, wykazuje znaczną czułość na prędkość odkształcenia (rys. 3). Dlatego do obliczeń numerycznych przyjęto lepkoplastyczny model ciała [7], w którym naprężenie płynięcia plastycznego w najprostszej postaci wyraża zależność (1):

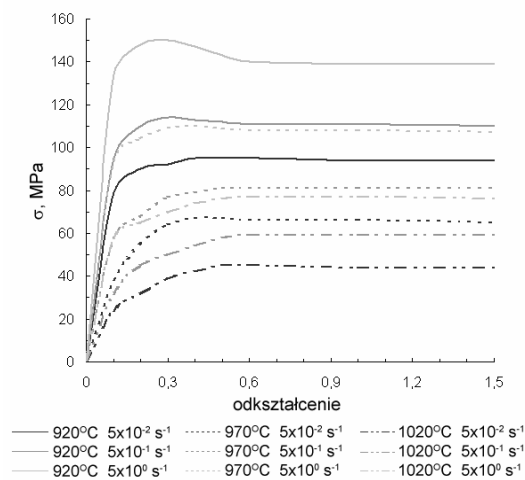
$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

gdzie: σ - naprężenie, ε - odkształcenie, $\dot{\varepsilon}$ - prędkość odkształcenia, T - temperatura.

Tablica 1. Skład chemiczny stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr [8]

Table 1. Chemical composition of titanium alloy Ti-6Al-2Mo-2Cr [8]

Ti	Al	Mo	Cr	Si	Fe
Baza	5,5-7,0	2,0-3,0	1,0-2,5	0,15-0,4	0,2-0,7



Rys. 3. Krzywe umocnienia stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr

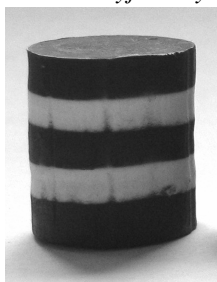
Fig. 3. Flow behaviour of titanium alloy Ti-6Al-2Mo-2Cr

Obliczenia numeryczne wykonano dla czterech materiałów wyjściowych walcowych o stałej objętości, lecz różnych średnicach: $\varnothing 20$ mm, $\varnothing 25$ mm, $\varnothing 30$ mm i $\varnothing 35$ mm. Założono, że materiał wyjściowy był uprzednio poddany obróbce cieplno-plastycznej gwarantującej drobne i równomierne ziarno w całej objętości, a więc o charakterystyce odpowiedniej dla materiałów wykazujących dużą czułość na prędkość odkształcenia. Do obliczeń numerycznych procesu kucia przyjęto warunki izotermiczne, tj. taką samą wartość temperatury materiału wyjściowego, matrycy i otoczenia, wynoszącą 920°C oraz prędkość przesuwu trawersy górnej suwaka prasy $0,01$ mm/s. Założono, że wskaźnik tarcia między narzędziami a odkształcanym materiałem dla wszystkich wariantów obliczeń jest stały i wynosi $0,3$.

2.2. Modelowanie fizyczne

Celem modelowania fizycznego było określenie charakteru płynięcia materiału podczas kształtowania odkuwki kołpaka, z uwzględnieniem zapełniania obszaru swobodnej powierzchni, w której mogą wystąpić naprężenia rozciągające. Do modelowania fizycznego posłużono się warstwowymi dwukolorowymi próbkami z plasteliny w postaci walców o średnicach: $\varnothing 20$ mm, $\varnothing 25$ mm, $\varnothing 30$ mm i $\varnothing 35$ mm (rys. 4). Plastelina poprawnie modeluje analizowany stop tytanu, gdyż krzywe płynięcia plasteliny w 20°C i stopów tytanu w 920°C mają zbliżony kształt [9]. Na rysunku 4 pokazano układ warstw w przekroju A-A odkuwki modelowej (rys. 5) w ostatnim etapie kucia dla modelu fizycznego (rysunki środkowe) i modelowania numerycznego (rysunki dolne) oraz układ warstw w materiale wyjściowym (rysunki górne).

a) *Materiał wyjściowy*



b)



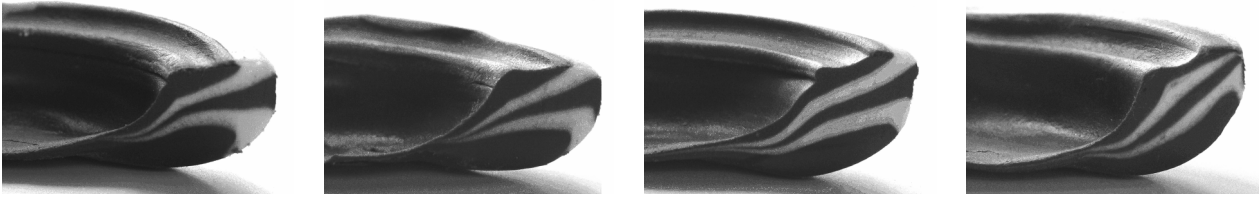
c)



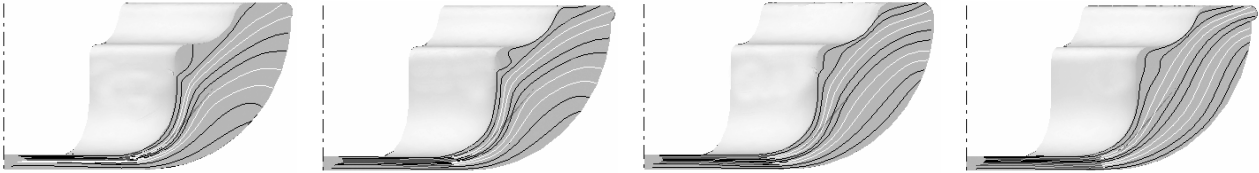
d)



Modelowanie fizyczne



Modelowanie numeryczne

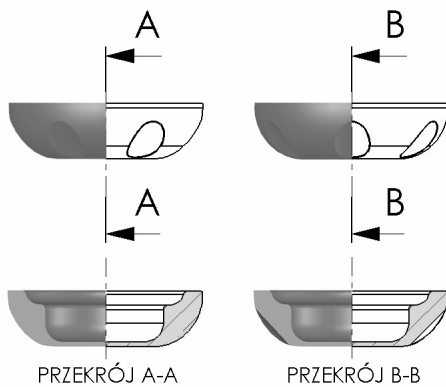


Rys. 4. Próbkki do modelowania fizycznego oraz układ warstw w przekroju A-A dla modelu fizycznego i numerycznego w ostatnim etapie kształtowania odkuwki kołpaka z materiału wyjściowego o średnicy:
a) $\varnothing 20$ mm, b) $\varnothing 25$ mm, c) $\varnothing 30$ mm i d) $\varnothing 35$ mm

Fig. 4. Samples for physical modelling and positions of layers in A-A section for physical and numerical model in final stages of forging process using diameter of forging stock: a) $\varnothing 20$ mm, b) $\varnothing 25$ mm, c) $\varnothing 30$ mm and d) $\varnothing 35$ mm

3. ANALIZA WYNIKÓW

Na rysunku 6 przedstawiono mapy rozkładu intensywności odkształcenia w charakterystycznych przekrojach A-A i B-B (rys. 5) odkuwki wykonanej z materiału wyjściowego w postaci walca o różnych średnicach. Uzyskane wyniki podano dla końcowego etapu procesu kucia po wypełnieniu wykroju matrycy.



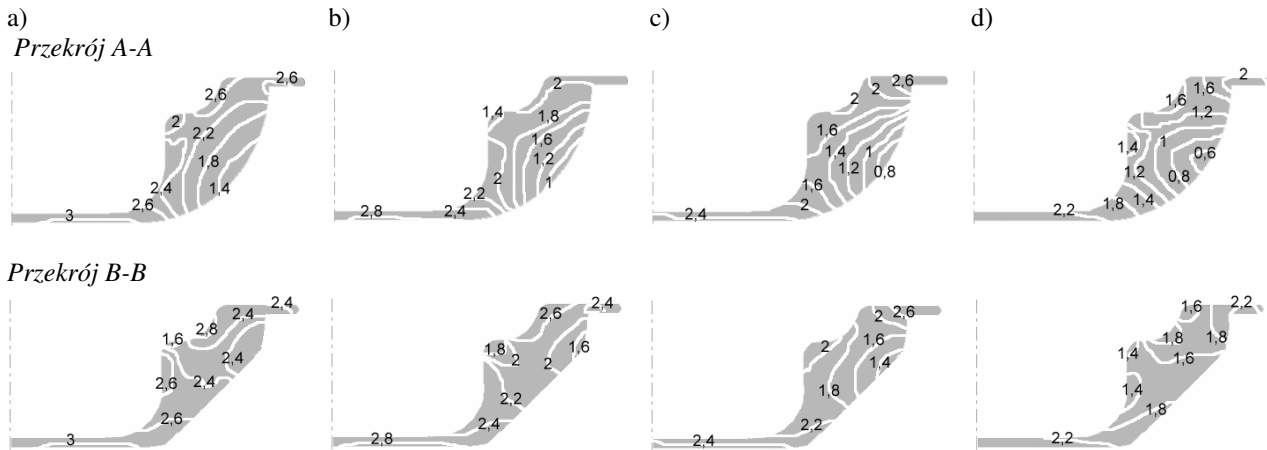
Rys. 5. Charakterystyczne przekroje odkuwki modelowej

Fig. 5. Typical sections of model forging

We wszystkich analizowanych wariantach kucia kołpaka maksymalne wartości intensywności odkształcenia koncentrują się w rejonie denka odkuwki oraz w obszarze wypłytki, co związane jest z przemieszczaniem się dużej części materiału w tych rejonach wykroju. Największe odkształcenia przy stosunkowo jedno-

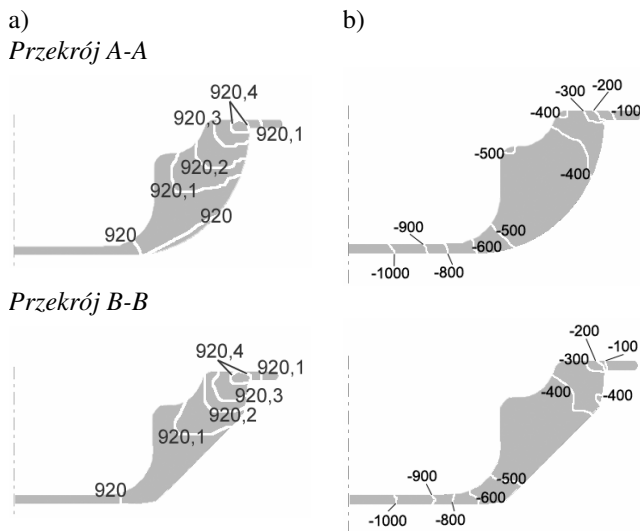
rodnym rozkładzie obserwuje się przy kuciu z materiału wyjściowego o średnicy $\varnothing 20$ mm, natomiast najmniejsze odkształcenia występują przy kształtowaniu ze wsadu $\varnothing 35$ mm. Duże wartości intensywności odkształcenia świadczą o znacznym przeformowaniu materiału, dzięki czemu uzyska się lepsze właściwości wytrzymałościowe wyrobu gotowego.

Ponieważ przyjęto izotermiczne warunki kucia, rozkład temperatury w procesie kucia odkuwki dla zadanej prędkości kształtowania jest równomierny w całej objętości odkuwki, bez względu na smukłość użytego materiału wyjściowego. Rysunek 7a przedstawia rozkład temperatury w końcowym etapie kucia z materiału wyjściowego $\varnothing 30$ mm. Wahania temperatury są minimalne, jej lokalny wzrost jest wynikiem zamiany energii mechanicznej prasy oraz tarcia na ciepło. Średnica zastosowanego materiału wyjściowego nie wpływa istotnie na wartość naprężeń średnich w ostatnim etapie kucia. Na rysunku 7b pokazano przykładowy rozkład naprężeń średnich dla materiału wyjściowego o średnicy $\varnothing 30$ mm w charakterystycznych przekrojach odkuwki. Największa wartość naprężeń ściskających występuje w denku odkuwki i waha się od 900 do 1000 MPa. Jest to związane z dużym stosunkiem średnicy denka do jego wysokości. Należy się spodziewać, że w tym obszarze odkuwki trwałość narzędzi ulega znacznemu obniżeniu.



Rys. 6. Wyznaczony numerycznie rozkład intensywności odkształcenia w charakterystycznych przekrojach odkuwki (wg rys. 5) wykonanej z materiału wyjściowego o średnicy: a) $\varnothing 20$ mm, b) $\varnothing 25$ mm, c) $\varnothing 30$ mm i d) $\varnothing 35$ mm

Fig. 6. Numerically estimated effective strain distribution in typical sections of hub cover forging (acc. to Fig. 5) using diameter of forging stock: a) $\varnothing 20$ mm, b) $\varnothing 25$ mm, c) $\varnothing 30$ mm and d) $\varnothing 35$ mm

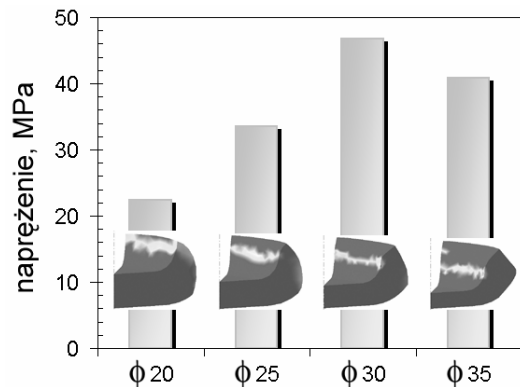


Rys. 7. Wyznaczony numerycznie rozkład:

a) temperatury ($^{\circ}\text{C}$) i b) naprężeń średnich (MPa) w charakterystycznych przekrojach odkuwki (wg rys. 5) wykonanej z materiału wyjściowego o średnicy $\varnothing 30$ mm
Fig. 7. Numerically estimated temperature (a) and mean stress (b) distribution in typical sections of hub cover forging (acc. to Fig. 5) using diameter of stock forging 30 mm

W przyjętym podziale procesu kucia odkuwki kołpaka na etapy stwierdzono, że najbardziej charakterystycznym jest etap drugi procesu kucia, w którym występują znaczne różnice w rozkładzie analizowanych parametrów. Rysunek 8 przedstawia lokalizację obszaru maksymalnych naprężeń rozciągających oraz ich wartość w drugim etapie kucia, tj. podczas swobodnego promieniowego przemieszczenia materiału. Przy kuciu z materiału

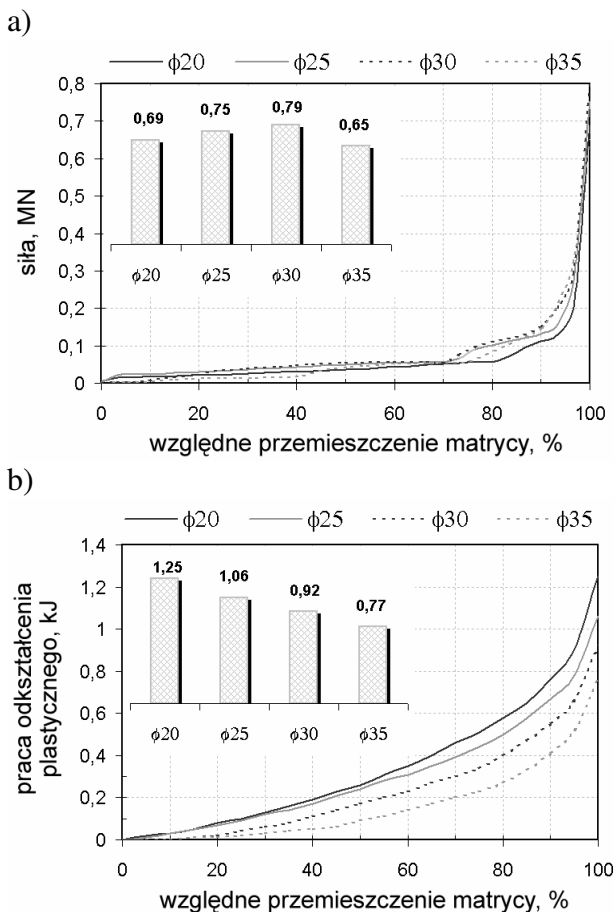
wyjściowego o średnicy $\varnothing 20$ mm naprężenia rozciągające są stosunkowo małe i wynoszą 22,5 MPa, natomiast przy kucia walca o średnicy $\varnothing 30$ mm ich wartość jest maksymalna i wynosi 46,76 MPa. W przypadku nałożenia się dodatkowych naprężeń spowodowanych niezbyt gładką powierzchnią w tym obszarze odkuwki, co może wystąpić w praktyce przemysłowej przy kuciu stopów tytanu [2], zachodzi prawdopodobieństwo pęknięcia materiału.



Rys. 8. Wpływ średnicy materiału wyjściowego na lokalizację obszarów i wartość maksymalnych naprężeń rozciągających w drugim etapie procesu kucia
Fig. 8. Influence of forging stock diameter for location of area and maximum value of tensile stress in second stage of forging process

Cienka powłoka środkowej części kołpaka, przy jej stosunkowo dużej powierzchni w końcowym etapie procesu kucia, niezależnie od innych warunków procesu, powoduje gwałtowny przyrost siły. Potwierdzają to wyniki

obliczeń numerycznych siły nacisku wyznaczone dla czterech smukłości materiału wyjściowego (rys. 9a). Zgodnie z przewidywaniem, opartym na wyżej przeprowadzonej analizie procesu, największe zróżnicowanie siły nacisku wynikające ze smukłości materiału wyjściowego występuje w drugim etapie procesu kucia. Obliczenia numeryczne wskazują, że w całym zakresie ruchu roboczego matrycy górnej, siła nacisku jest najmniejsza przy kształtowaniu z materiału wyjściowego o średnicy $\varnothing 20$ mm. Przy obniżaniu smukłości materiału wyjściowego stwierdzono wzrost maksymalnej siły potrzebnej do uzyskania założonych wymiarów odkuwki, przy czym najmniejsza smukłość, przy średnicy materiału wyjściowego $\varnothing 35$ mm, również sprzyja obniżeniu siły w końcowym etapie kucia.



Rys. 9. Wpływ średnicy materiału wyjściowego na nacisk prasy (a) i pracę odkształcenia plastycznego (b) w procesie kucia odkuwki kołpaka

Fig. 9. Influence of diameter of forging stock on pressure load (a) and plastic work (b) of hub cover forging process

Należy to tłumaczyć korzystnymi warunkami płynięcia materiału w ostatnim etapie procesu kucia do obszaru wypływki. Potwierdzeniem tego może być również wykres pracy odkształcenia plastycznego kucia odkuwek z materiału wyjściowego o różnej smukłości (rys. 9b).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Oceny procesu kucia stopu Ti-6Al-2Mo-2Cr w warunkach izotermicznych dokonano na podstawie map rozkładu intensywności odkształcenia, wielkości naprężeń średnich oraz sił na przykładzie procesu kucia odkuwki kołpaka, kształtowanej w procesie wyciskania promieniowego przy występowaniu naprężeń rozciągających w pośrednim etapie procesu kucia, zależnie od smukłości materiału wyjściowego.

Zastosowanie materiału wyjściowego o smukłości 1,15 ($\varnothing 20 \times 23$ mm) zapewnia znaczne przeformowanie materiału, lecz jednocześnie powoduje skłonność do tworzenia zakuc. Podczas swobodnego promieniowego wyciskania, z jakim mamy do czynienia w drugim etapie procesu, dla materiału wyjściowego o dużej smukłości prawdopodobieństwo pęknięcia materiału jest najmniejsze. Potwierdzają to badania modelowe wykonane na plastelinie, w których największa skłonność do rozwarstwień na powierzchni bocznej próbek wystąpiła przy małej smukłości materiału wyjściowego 0,034 ($\varnothing 30 \times 10,2$ mm).

Zaletą procesu kucia w warunkach izotermicznych, zalecanych do wytwarzania odkuwek ze stopów tytanu dla wyrobów o specjalnym przeznaczeniu, jest możliwość uzyskania struktury jednorodnej w całej objętości odkuwki oraz minimalizacja liczby zabiegów kucia, wynikająca między innymi ze skłonności do pęknięcia przy niesprzyjającym stanie naprężeń rozciągających.

Przy masowej produkcji opłacalność procesu będzie zależała nie tylko od jakości wyrobu, ale również od czynników ekonomicznych. Jednym z nich jest uzysk materiału, który będzie zdecydowanie większy, gdy zastosuje się cięcie materiału wyjściowego o większej smukłości. Mniejsza powierzchnia cięcia poprawia jakość czoła materiału wyjściowego i w konse-

kwencji minimalizuje skłonność do powstawania wad odkuwek.

Praca finansowana przez MEiN, nr umowy 3 T08B 010 30.

LITERATURA

- [1] Gurrappa I.: Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. *Materials Characterization* 51 (2003), s. 131-139.
- [2] Hu Z.M., Dean T.A.: Aspects of forging of titanium alloys and the production of blade forms. *Journal of Materials Processing Technology* 111 (2001), s. 10-19.
- [3] Filip R., Sieniawski J.: Kierunki rozwoju konstrukcyjnych stopów tytanu. *Mechanika* 1999 nr 250, s. 13-20.
- [4] Sieniawski J.: Przemiany fazowe i ocena możliwości kształtowania struktury w wieloskładnikowych stopach tytanu z zawartością Al, Mo, V i Cr. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika* nr 10, Rzeszów 1985.
- [5] Bednarek S., Sińczak J., Skubisz P.: Isothermal forging of thin-walled parts of two-phase titanium alloys. *Problems and modern techniques in aspect of engineering and education* (2006), s. 207-212.
- [6] Sińczak J., Bednarek S.: Fizyczne i numeryczne modelowanie procesu kucia dwufazowych stopów tytanu w warunkach izotermicznych. *Oficyna Wydawnicza PW*, 2007. *Mechanika*, z. 216, s. 59-66.
- [7] Sińczak J.: *Zeszyty Naukowe AGH, Zeszyt 144*, Kraków 1992.
- [8] Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W.: *Tytan i jego stopy*. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [9] Gronostajski Z., Hawryluk M.: *Materiały stosowane w modelowaniu fizycznym*. *Oficyna Wydawnicza PW*, 2007. *Mechanika*, z. 207, s. 127-132.