Projekt kluczowy
Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

SPOTKANIE PANELI EKSPERTÓW
28-29 Czerwca 2010

ZB 8

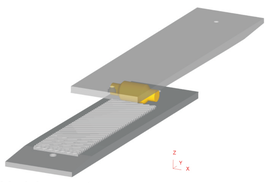
Plastyczne kształtowanie lotniczych stopów Al (w tym Al-Li) oraz Ti

Politechnika Śląska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska, Politechnika Częstochowska

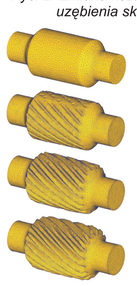
Wyniki badań

Modelowanie numeryczne procesu walcowania uzębienia skośnego

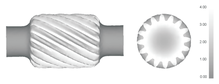
Wykonano analizę termomechaniczną procesu walcowania na gorąco zębów skośnych kształtowanych zębatkami prostymi. Kształt narzędzi jest zbliżony do stosowanego w znanej metodzie Roto-Flo. Obliczenia wykonano w programie DEFORM-3D, zakładając, że walcowanie przebiega bez wydłużenia odkuwki. W efekcie przeprowadzonych symulacji wyznaczono rozkłady odkształceń, temperatur oraz składowych siły walcowania. Stwierdzono, iż stosując narzędzia o zakładanym kształcie można skutecznie walcować uzębienia skośne na wałkach ze stopu aluminium w gatunku PA38.



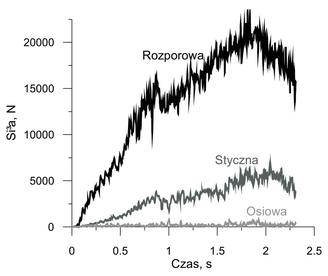
Rys. 1. Model geometryczny procesu walcowania uzębienia skośnego



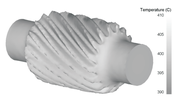
Rys. 2. Zmiana kształtu odkuwki podczas procesu walcowania uzębienia skośnego



Rys. 3. Odwalcowany wałek z zaznaczonym rozkładem intensywności odkształcenia



Rys. 5. Rozkłady składowych siły walcowania w analizowanym procesie kształtowania



Rys. 4. Rozkład temperatury w wyrobie odwalcowanym

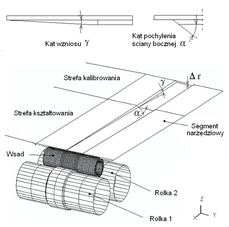
Wnioski

Uzyskane wyniki dla stopu aluminium PA38 wskazują na możliwość skutecznego kształtowania uzębienia tego typu za pomocą proponowanej metody. Z tego względu w najbliższej przyszłości planowane jest przeprowadzenie (w Politechnice Lubelskiej) badań doświadczalnych walcowania poprzecznego uzębienia skośnego (przebiegającego przy parametrach przyjętych w obliczeniach), weryfikujących wykonane obliczenia. Wyniki tych badań będą przedstawione w literaturze specjalistycznej.

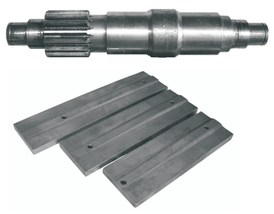
Wyniki badań

Zmiany grubości ścianek wyrobów drążonych obciskanych obrotowo

W ramach badań kształtowania wyrobów drążonych wykonano analizę procesu obciskania obrotowego wyrobów drążonych wykonywanych ze stopu aluminium 6061 oraz stopu tytanu Ti6Al4V. Przeprowadzone obliczenia numeryczne objęły przypadek kształtowania pojedynczego, centralnego przewężenia wyrobu drążonego z wsadu o średnicy d_0=25mm, którą redukowano do d_f=20mm. Analiza uzyskanych wyników pod kątem parametrów technologicznych i dokładności wykonania stanowiła podstawę do wytypowania zestawu narzędziowego (dwie rolki robocze oraz pojedynczy segment płaski), który wykonano w metalu z przeznaczeniem do przeprowadzenia prób doświadczalnych. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano walcarkę poprzeczno – klinową LUW-2, którą przystosowano do realizacji procesu obciskania obrotowego. Uzyskane wyniki świadczą o możliwości praktycznego stosowania tej technologii w kształtowaniu wyrobów drążonych.

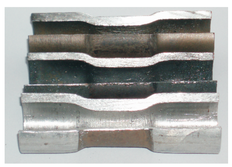


Rys. 1. Schemat procesu obciskania obrotowego

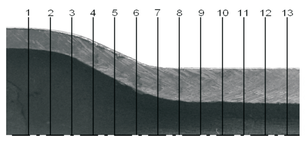


Rys. 2. Narzędzia stosowane w badaniach doświadczalnych procesów obciskania obrotowego

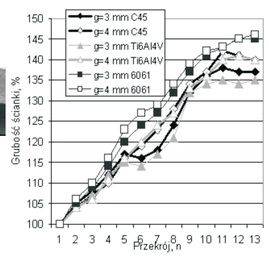
Rys. 3. Wsady drążone ze stopu aluminium 6061 oraz uzyskane wyroby z centralnym przewężeniem



Rys. 4. Przekroje wzdłużne badanych wyrobów (C45, 6061 oraz Ti6Al4V dla porównania)



Rys. 5. Rozkłady grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych badanych wyrobów wykonanych z C45, 6061 oraz Ti6Al4V



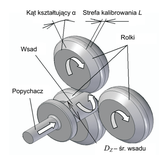
Wnioski

Rezultaty przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdziły możliwość kształtowania wyrobów drążonych metodą obciskania obrotowego. Efektem realizacji tego procesu były wyroby ze stopów aluminium i tytanu oraz stali charakteryzowane przez miejscowy wzrost grubości ścianek w strefie redukcji średnicy. Jest to korzystne i może być stosowane w dalszej obróbki mechanicznej tych obszarów celem wytworzenia np. elementów uzębień. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość uzyskiwania dostatecznie wąskich zakresów tolerancji wymiarowych owalności, co stanowi jeden z kluczowych problemów w procesach walcowania poprzecznego wyrobów drążonych. Sporadyczne występowanie w procesie zjawiska poślizgu, szczególnie dla wyrobów o mniejszych grubościach ścianki, wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych prac nad konstrukcją narzędzi oraz realizacji badań wpływu stosowanych parametrów technologicznych na stabilność procesów kształtowania.

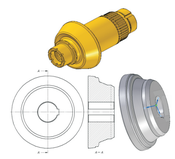
Wyniki badań

Analiza procesu przepychania obrotowego wałka drążonego ze stopu aluminium 6061

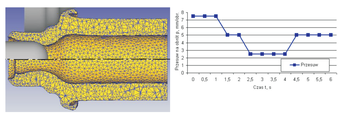
W ramach badań kształtowania wyrobów drążonych wykonano analizę procesu przepychania obrotowego wałka drążonego wykonywanego ze stopu aluminium 6061. Analizy numeryczne tego przypadku kształtowania wykonano za pomocą oprogramowania Deform3D z pełnym uwzględnieniem zjawisk cieplnych zachodzących w trakcie procesu. Uzyskane wyniki obliczeń w postaci rozkładów naprężeń, odkształceń oraz wartości sił w kolejnych stadiach kształtowania pozwoliły na wytypowanie zestawu narzędziowego (trzy rolki robocze oraz trzpień kalibrujący), który zastosowano w próbach doświadczalnych. W badaniach tych wykorzystano agregat do przepychania obrotowego PO-1, wyposażony w układ pomiarowy umożliwiający rejestrację sił kształtowania. Otrzymane rezultaty potwierdziły możliwość stosowania tej technologii kształtowania wyrobów drążonych ze stopów aluminium.



Rys. 1. Schemat procesu przepychania obrotowego



Rys. 1. Schemat procesu przepychania obrotowego



Rys. 3. Przekroje wzdłużne wałków drążonych przepychanych obrotowo z trzpieniem profilowym (a) oraz bez trzpienia (b) wraz z przebiegiem zmian przesuwu p w funkcji czasu

Rys. 4. Rolki profilowe stosowane w badaniach doświadczalnych

Rys. 5. Stopniowane wyroby drążone ze stopu aluminium 6061 uzyskane w procesie przepychania obrotowego (p = 5 mm/obr.)

Rys. 6. Porównanie przekrojów wzdłużnych wyrobów ze stopu aluminium 6061 oraz ze stali C45 (p = 5 mm/obr.)

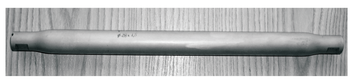
Wnioski

Wyniki obliczeń numerycznych potwierdziły możliwość kształtowania wyrobów drążonych, ze stopów aluminium, metodą przepychania obrotowego. Rezultatem tego procesu mogą być stopniowane wyroby drążone posiadające równomierne przebiegi grubości ścianek w strefie redukcji średnic. Biorąc pod uwagę wyniki badań doświadczalnych, sekwencja zmian prędkości podawania materiału do przestrzeni roboczej (przesuw na obrót *p*) wymaga weryfikacji. Porównanie przekrojów wzdłużnych wyrobów stalowych oraz ze stopu aluminium wskazuje odmienny charakter płynięcia obu tych materiałów w procesach realizowanym przy takich samych parametrach technologicznych. W dalszych pracach nad rozwojem technologii przepychania obrotowego wyrobów ze stopów aluminium celowym wydaje się wprowadzenie trzpieni kalibrujących. Narzędzie to, oprócz zapewnienia równomiernego przebiegu zmian grubości ścianek będzie także poprawiało osiowe prowadzenia wyrobu w trakcie procesu, co powinno ograniczyć tolerancje wymiarowe projektowanych do wykonania wyrobów.

Wyniki badań

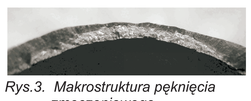
Badania w zakresie zwiększenia trwałości zmęczeniowej cięgien rurowych wytwarzanych ze stopów aluminium

W ramach podzadania rozpoczęto badania dotyczących kształtowania zakończeń cięgien rurowych. Celem badań była analiza właściwości wyrobu i możliwości zwiększenia ich trwałości, szczególnie zmęczeniowej na przykładzie cięgna stosowanego w budowie śmigłowców w jednym z zakładów krajowych. Badania obejmowały ocenę mikrostruktury, oraz modelowanie numeryczne procesu wytwarzania według dotychczasowej technologii. Poddano analizie wpływ zmiany wybranych parametrów technologicznych na uzyskanie korzystniejszych cech wyrobu. Wnioski z przeprowadzonych prac posłużą do opracowania nowej technologii kształtowania, oraz do wykonania elementów modelowych, które poddane zostaną weryfikującym próbom stanowiskowym.

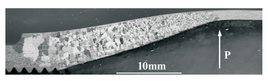


Rys.1. Fotografia elementu

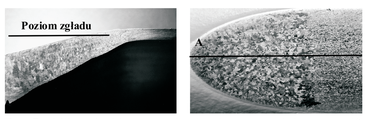
Rys.2. Przekrój zakończenia gwintowego



Rys.3. Makrostruktura pęknięcia zmęczeniowego

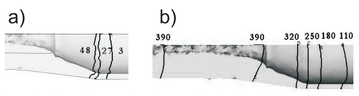


Rys.4. Mikrostruktura przekroju cięgna z zaznaczonym P miejscem pęknięcia zmęczeniowego, trawiono odczynnikiem Kellera



Rys.5. Mikrostruktura przekroju cięgna – miejsce przejścia w część cylindryczną

Rys.7. Mikrotwardość wzdłuż linii A - (rys.5b)



Rys. 9. Wyniki symulacji - rozkład: a – odkształceń w %, b - temperatury w °C

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych symulacji zauważono, że na kształt cięgna w strefie przejściowej zasadniczy wpływ ma stan cieplny materiału (rozkład temperatury). Jest on wynikiem czasu kontaktu wsadu z gorącym narzędziem na który wpływ ma prędkość ruchu narzędzi, temperatura narzędzia, czasu trwania procesu i czas wychładzania wsadu po przewężaniu. Wartość współczynnika tarcia ma drugorzędne znaczenie w przypadku obniżonej temperatury narzędzi 400°C. Jego wpływ na geometrię wyrobu staje się istotny przy temperaturze podwyższonej 480°C (niewykorzystywanej).

Wprawdzie wyższa temperatura umożliwia łatwiejsze kształtowanie materiału przy niższej sile, to jednakże z uwagi na charakterystyczny rozkład odkształceń związany z tworzeniem silnie zarysowanej strefy przejściowej i obniżeniem plastyczności nie jest ona zalecana. Mimo braku w strefie przejściowej intensywnego rozrostu ziarna dla opisanych warunków procesu, to jednak z uwagi na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej konieczna jest modyfikacja technologii kształtowania cięgien.

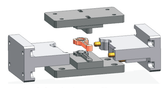
Ponieważ nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie jej występowania, proponuje się zmianę jego położenia końcowego. Za korzystne warunki kształtowania uznano te, które powodują przemieszczenie strefy przejściowej w kierunku cylindrycznej części cięgna, poza strefę przejściową. W takim przypadku, będzie ona poddawana działaniu mniejszych sił zginających, co powinno wpłynąć na zwiększenie ich trwałości.

Wyniki badań

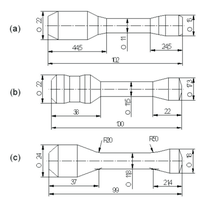
Kucie odkuwki korbowodu bez wypływki

W celu poprawy jakości odkuwek korbowodów podjęto próbę ich wykonania metodą kucia bezwypływkowego. Jako maszynę kuźniczą zastosowano trójsuwakową prasę kuźniczą, będącą w posiadaniu Politechniki Lubelskiej. Funkcjonalność prasy umożliwia kucie odkuwki korbowodu przy zastosowaniu czteroczęściowych narzędzi złożonych z dwóch matryc bocznych, matrycy dolnej i stempla.

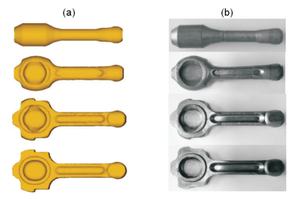
W celu zaprojektowania procesu zapewniającego otrzymanie prawidłowego wyrobu wykonano szereg symulacji, w których poddano analizie kinematykę płynięcia materiału, rozkład odkształceń, rozkład naprężeń i siły kształtowania. Na podstawie uzyskanych rezultatów opracowano kształt przedkuwki zapewniający prawidłowe wypełnienie wykroju. Założono, że przedkuwkę można uzyskać w procesie walcowania poprzeczno-klinowego. Opracowano model takiego procesu i na podstawie symulacji stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie odpowiedniego kształtu przedkuwki. Przy użyciu zaprojektowanych narzędzi wykonano szereg prób kucia. W czasie eksperymentu rejestrowano parametry procesu takie jak: siła kształtowania stempla, temperatura nagrzewania próbki, prędkość narzędzi. Przeprowadzono korektę kształtu przedkuwki w celu zapewnienia dokładnego wypełnienia wykroju. Na podstawie wykonanych badań teoretycznych i doświadczalnych stwierdzono, że możliwe jest kucie bezwypływkowe odkuwki korbowodu w trójsuwakowej prasie kuźniczej.



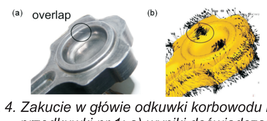
Rys. 1. Model graficzny narzędzi stosowanych w procesie kucia bezwypływkowego odkuwki korbowodu



Rys. 2. Kształt i główne wymiary przedkuwek: (a) nr 1, (b) nr 2 and (c) nr 3.



Rys. 3. Porównanie kształtu odkuwki w kolejnych etapach kucia: a) wyniki symulacji, b) wyniki doświadczalne



Rys. 4. Zakucie w głowie odkuwki korbowodu kształtowanego z przedkuwki nr 1: a) wyniki doświadczalne, b) wyniki teoretyczne z zaznaczonymi wektorami prędkości płynięcia materiału

Rys. 5. Odkuwka korbowodu ze stopu aluminium 6101A (z widocznymi niewypełnieniami w części trzonowej i małej głowy) kształtowana siłą równą 610 kN (obecnie po modernizacji układu hydraulicznego prasy badania zostaną wykonane przy zastosowaniu siły maksymalnej wynoszącej 1000 kN).

Wnioski

Na podstawie wykonanych analiz teoretycznych i badań doświadczalnych sformułowano następujące wnioski:

1. Możliwe jest wykonanie odkuwki korbowodu bez wypływki w TPK, dzięki zastosowaniu narzędzi z 3 płaszczyznami podziału. Trzy ruchome narzędzia w tej prasie pozwalają zastosować przedkuwkę o średnicy większej niż wymiar poprzeczny wykroju. W pierwszy etapie musi następować ruch narzędzi poziomych, które spłaszczają przedkuwkę, a w drugim etapie górne narzędzie kształtuje gotową odkuwkę. Taki proces nie jest możliwy do realizacji przy zastosowaniu typowych maszyn kuźniczych, wyposażonych w jedno ruchome narzędzie.
2. Proces kucia odkuwki korbowodu bez wypływki jest materiałooszczędny i przebiega w jednym cyklu roboczym prasy. Brak wypływki zapewnia ciągłość włókien, co powinno zapewnić lepsze własności od uzyskiwanych w innych metodach wytwarzania korbowodów. Jest to szczególnie ważne dla tego typu elementów, które pracują przy obciążeniu zmęczeniowym.
3. Na podstawie wyników analizy numerycznej stwierdzono, że możliwe jest wykonanie przedkuwki do kucia korbowodu w procesie walcowania poprzeczno-klinowego. Dobra zgodność wyników teoretycznych i doświadczalnych uzyskana dla procesu kucia pozwala sądzić, że wyniki symulacji procesu walcowania przedkuwki również dobrze odwzorowują proces rzeczywisty. Planowana jest dalsza optymalizacja tego procesu oraz weryfikacja doświadczalna.
4. W procesie kształtowania korbowodu składającego się z walcowania poprzeczno-klinowego przedkuwki i kucia bezwypływkowego występują również zjawiska niekorzystne. Zaliczyć do nich należy konieczność stosowania naddatku technologicznego materiału przy walcowaniu, który obcinany jest z obu stron walcowanej przedkuwki oraz występowanie wypływki czołowej podczas operacji kucia, którą należy usunąć. Wysokość tej wypływki może być zróżnicowana na obwodzie odkuwki, z powodu trudności z osiowym ułożeniem przedkuwki w wykroju i niesymetrycznym płynięciem materiału. Mogą występować również wahania objętości przedkuwki, co należy uwzględnić przy określaniu tolerancji wymiaru pionowego korbowodu.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Gontarz Andrzej, Pater Zbigniew, Tofil Arkadiusz: ***Numerical analysis of unconventional forging process of hollowed shaft from Ti-6Al-4V alloy.*** Proceedings of 4th International Conference On Thermal Process Modeling And Computer Simulation, 31 May – 2 June 2010, Shanghai, CHINA.
- Zbigniew Pater, Andrzej Gontarz and Arkadiusz Tofil: ***The analysis of the cross-wedge rolling process of toothed shafts made from 2618 aluminium alloy***. Proceedings of 4th International Conference On Thermal Process Modeling And Computer Simulation, 31 May – 2 June 2010, Shanghai, CHINA.

Publikacje

- Pater Z., Gontarz A., Samołyk G., Bartnicki J.: ***Analysis of Cross Wedle Rolling Proces sof Toothed Titanum Shafts***. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2009, Issue 3, Vol. 54, s. 617-626

Zgłoszone (przyjęte do druku)

- Piotr Żołnik, Zbigniew Pater: ***Analiza numeryczna walcowania gwintu śruby M20x2,5 wykonanej ze stopu aluminium w gatunku 2618***. *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Zbigniew Pater, Andrzej Gontarz: ***Modelowanie numeryczne procesu walcowania uzębienia skośnego.*** *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Jarosław Bartnicki, Jarosław Magryta, Zbigniew Pater: ***Zmiany grubości ścianek wyrobów drążonych obciskanych obrotowo***. *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Jarosław Bartnicki: ***Analiza procesu przepychania obrotowego wałka drążonego ze stopu aluminium 6061***. *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Janusz Tomczak, Andrzej Gontarz, Zbigniew Pater, Krzysztof Drozdowski: ***Badania porównawcze stopów aluminium PA31 oraz 2618A w aspekcie zastosowań w konstrukcjach lotniczych.*** *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Krzysztof Łukasik: ***Badania wstępne w zakresie zwiększenia trwałości zmęczeniowej cięgien rurowych wytwarzanych ze stopów aluminium.*** *Praca przyjęta do druku w „Rudy i Metale Nieżelazne“*
- Andrzej Gontarz, Zbigniew Pater, Grzegorz Samołyk, Arkadiusz Tofil: ***Forging of Connecting Rod Without Flash.*** *Praca przyjęta na konferencję Metal Forming 2010, druk w czasopiśmie Steel Research International*

Prace mgr, dr, hab.

Prace magisterskie obronione:

- Dariusz Hanaj: ***Analiza numeryczna prasowania obwiedniowego wyprasek ze stopu tytanu Ti6Al4V.*** Promotor: dr inż. Grzegorz Samołyk.

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO