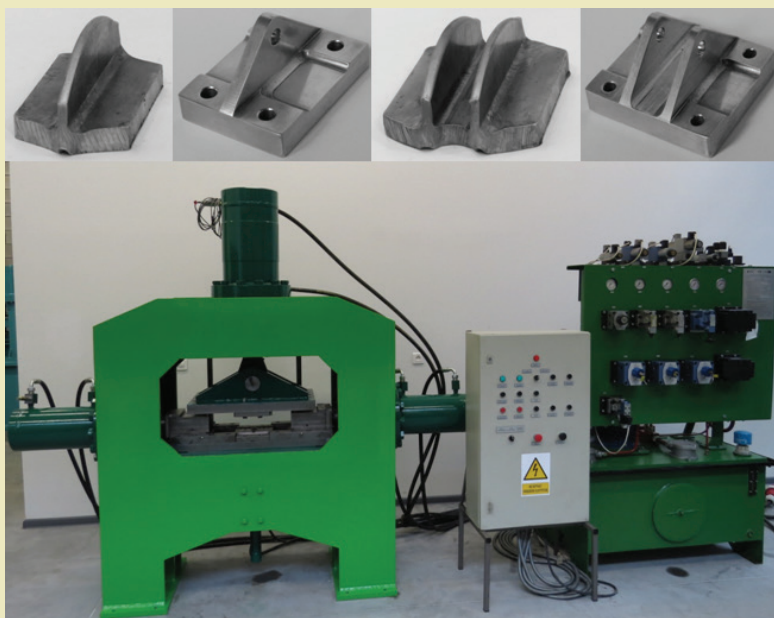




Anna Dziubińska, Andrzej Gontarz

Kucie odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu

The production of magnesium alloy parts with ribs by forging method



Lublin 2016

M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Kucie odkuwek uźebrowanych
ze stopów magnezu

The production of magnesium alloy
parts with ribs by forging method

Monografie – Politechnika Lubelska



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.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Anna Dziubińska
Andrzej Gontarz

Kucie odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu

The production of magnesium alloy
parts with ribs by forging method



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Hadasik, Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater, Politechnika Lubelska

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.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-209-3

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

STRESZCZENIE	7
ABSTRACT	8
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI	9
1. WPROWADZENIE	10
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	13
2.1 Zastosowanie wyrobów płaskich z żebrami w przemyśle	13
2.2 Przegląd metod wytwarzania wyrobów uźebrowanych	17
2.3 Ogólna charakterystyka stopów magnezu	26
2.3.1 Własności stopów magnezu	26
2.3.2 Zastosowanie stopów magnezu w przemyśle	32
2.3.3 Kształtowanie plastyczne odkuwek ze stopów magnezu	37
2.4 Wnioski z analizy stanu zagadnienia.....	51
3. BADANIA WŁASNOŚCI WYBRANYCH STOPÓW MAGNEZU W WARUNKACH KSZTAŁTOWANIA NA GORĄCO	52
3.1 Badania plastometryczne – budowa modelu materiałowego.....	52
3.1.1 Metodyka badawcza	52
3.2 Wyniki badań i ich analiza	54
3.3 Badanie warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania plastycznego	62
3.3.1 Metodyka badawcza	63
3.3.2 Wyniki badań i ich analiza.....	65
4. ANALIZA TEORETYCZNA PROCESÓW KSZTAŁTOWANIA ODKUWEK PŁASKICH Z ŻEBRAMI ZE STOPÓW MAGNEZU	72
4.1 Analiza teoretyczna procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrem	72
4.1.1 Metodyka badawcza	72
4.1.2 Wyniki symulacji numerycznych	75
4.1.3 Zjawiska ograniczające proces	80
4.2 Analiza teoretyczna procesów kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami.....	86
4.2.1 Metodyka badawcza	86
4.2.2 Wyniki symulacji numerycznych	88
4.2.3 Zjawiska ograniczające proces	91

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA ROZWIĄZAŃ TEORETYCZNYCH	96
5.1 Metodyka badań	96
5.1.1 Przygotowanie próbek do badań.....	96
5.1.2 Opis stanowiska badawczego	97
5.1.3 Trójsuwakowa prasa kuźnicza	97
5.1.4 Zestawy narzędzi kuźniczych użyte do badań	99
5.1.5 System grzewczy do podgrzewania narzędzi kuźniczych.....	103
5.1.6 Zakres badań doświadczalnych.....	104
5.2 Wyniki badań doświadczalnych procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem	104
5.3 Wyniki badań doświadczalnych procesów kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami	113
6. BADANIA JAKOŚCIOWE UKSZTAŁTOWANYCH ODKUWEK Z ŻEBRAMI ZE STOPÓW MAGNEZU	119
6.1 Badania mikrostruktury	119
6.1.1 Metodyka badawcza	119
6.1.2 Wyniki badań i ich analiza.....	120
6.2 Badania własności mechanicznych	123
6.2.1 Metodyka badawcza	123
6.2.2 Wyniki badań i ich analiza.....	124
7. PRZYKŁADY PROCESÓW WYTWARZANIA WYROBÓW UŻEBROWANYCH ZE STOPÓW MAGNEZU	127
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	130
9. BIBLIOGRAFIA	134

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono aspekty teoretyczne i technologiczne opracowanych nowych sposobów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu. Omówiono zastosowanie wyrobów uźebrowanych w przemyśle oraz główne metody ich wytwarzania. Dokonano ogólnej charakterystyki stopów magnezu ze szczególnym uwzględnieniem grupy przeznaczonej do przeróbki plastycznej. Podano najczęstsze zastosowanie stopów magnezu w różnych gałęziach przemysłu. Przeprowadzono analizę stanu zagadnienia w zakresie warunków kucia tych stopów. Przedstawiono wybrane wyniki badań teoretyczno-doświadczalnych nowych procesów kucia na gorąco odkuwek z żebrami ze stopów magnezu w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Analizę teoretyczną założonych sposobów kształtowania wykonano w oparciu o symulacje numeryczne metodą elementów skończonych. Dokonano oceny rozkładu naprężeń, odkształceń, temperatury i sił kształtowania. Zidentyfikowano zjawiska ograniczające procesy kształtowania, do których zaliczono: pęknięcie, wyboczenie, zakucie i błędy kształtu. Wyniki teoretyczne opracowanych procesów potwierdziły możliwość otrzymania wyrobów prawidłowych. Przeprowadzono weryfikację doświadczalną zaproponowanych rozwiązań teoretycznych. Uzyskano dobrą zgodność pomiędzy eksperymentem i wynikami teoretycznymi. Dla ukształtowanych odkuwek z żebrami ze stopu AZ31 przeprowadzono badania jakościowe. Na podstawie uzyskanych wyników teoretyczno-doświadczalnych zaprojektowano i zrealizowano procesy kucia nową metodą przykładowych wyrobów z jednym żebrzem i z dwoma żebrami ze stopu AZ31. Sformułowano szereg wniosków o charakterze poznawczym oraz praktycznym w formie wytycznych do projektowania nowo opracowanych procesów.

ABSTRACT

This book presents the theoretical and practical aspects of new methods for producing flat parts with ribs made of magnesium alloys. The most popular production methods and industrial applications of ribbed parts are described. In addition, magnesium alloys are described, with a particular emphasis on a group of magnesium alloys for metal forming. The most common applications of magnesium alloys in different industrial sectors are given. Moreover, the book surveys the state-of-the-art on the problem of forging processes for magnesium alloys. It also reports a selection of numerical and experimental results of the new hot forging processes for magnesium alloys in a three-slide forging press. The processes were modelled numerically by the finite element method. The distributions of stresses, strains, temperature and forming forces are determined. What is more, the processes are examined with respect to failure modes such as cracking, buckling, lapping and shape defects. The numerical results reveal that the shape of ribbed parts produced by these processes is correct. Next, the numerical results are verified in experiments, and the experimental results show good agreement with the numerical findings. In addition, the produced AZ31 alloy ribbed parts are subjected to qualitative tests. Based on the numerical and experimental results, it was possible to design and run forging processes by the new method for one-rib and two-rib parts made of AZ31 alloy. The conclusions drawn with respect to design of the new forging methods are significant both in terms of research and practice.

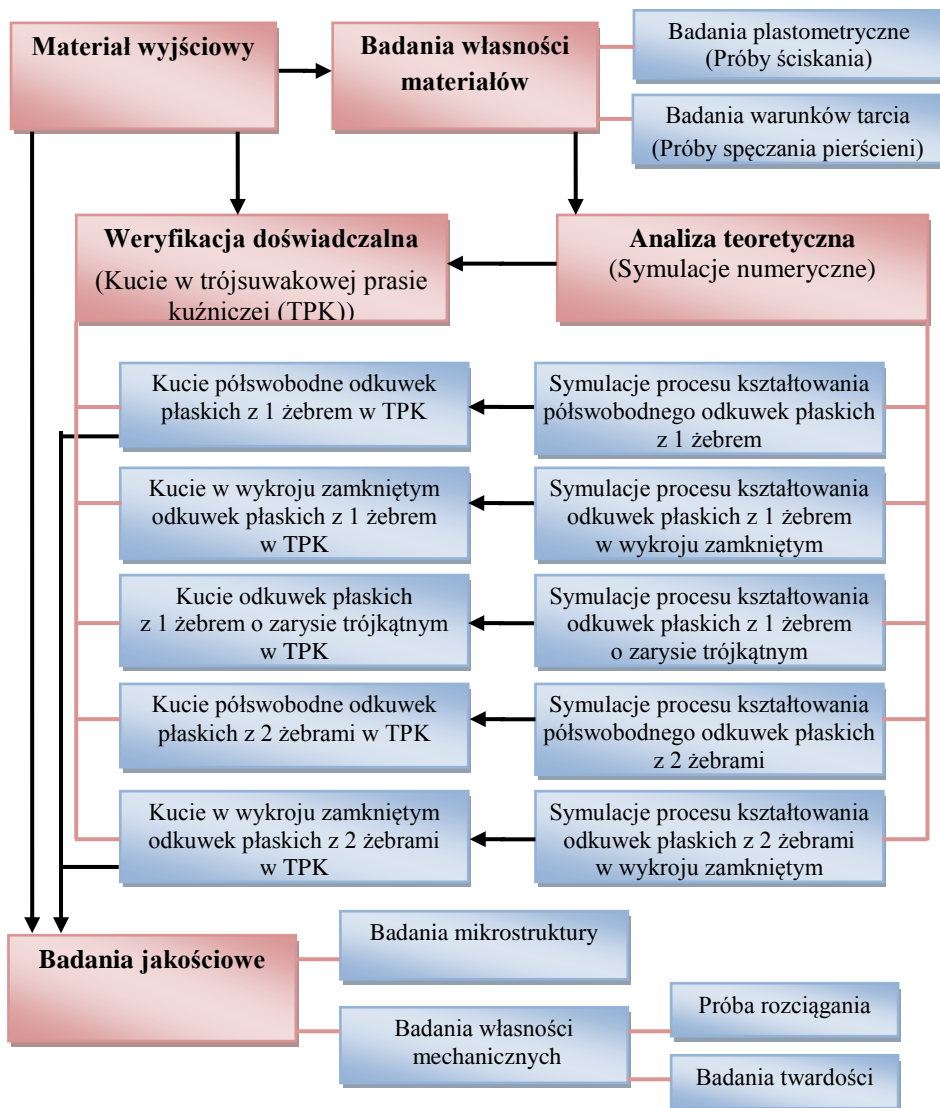
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI

A_s	– wydłużenie
A_h	– współczynnik nierównomierności zębra
A_s	– współczynnik poszerzenia
g_0	– grubość wsadu
g_z	– grubość zębra
GRG2	– metoda optymalizacji Generalized Reduced Gradient
h_{max}	– maksymalna wysokość zębra (mierzona w środku wysokości zębra)
h_{min}	– minimalna wysokość zębra po bokach (mierzona w płaszczyznach ograniczających szerokość odkuwki do 50 mm)
k	– współczynnik spęczania
k_{gr}	– graniczny współczynnik spęczania wsadu
l_w	– długość wsadu
l_s	– długość swobodna spęczanego wsadu
l_c	– długość czynna narzędzi
m	– czynnik tarcia
s_0	– szerokość początkowa wsadu
s_{max}	– maksymalna szerokość podstawy
t_w	– temperatura wsadu
t	– temperatura narzędzi
TPK	– trójsuwakowa prasa kuźnicza
v	– prędkość ruchu narzędzi
ε	– odkształcenie zastępcze
σ_p	– naprężenia uplastyczniające
μ	– współczynnika tarcia

1. WPROWADZENIE

Stopy magnezu zaliczane do metali lekkich stanowią grupę przyszłościowych materiałów konstrukcyjnych. Ich mała gęstość i dobre własności mechaniczne spowodowały duże zainteresowanie przemysłu lotniczego wytwarzaniem części z tych stopów, m.in. PZL – Świdnik S. A. Analiza części lotniczych wykazała, że do budowy samolotów stosuje się grupę elementów płaskich z żebrami. Części te są głównie wykorzystywane na wsporniki, pokrywy, zasłony, klapy. Obecnie tego typu wyroby w warunkach przemysłu krajowego wytwarzane są głównie ze sprowadzanych z zagranicy odlewów obrabianych mechanicznie na gotową część. Odlewy te charakteryzują się stosunkowo małą wytrzymałością i odpornością na korozję. Konieczność ich stosowania podyktowana jest brakiem możliwości pozyskiwania takich części wykonanych metodami obróbki plastycznej. Zastosowanie odkuwek jako półfabrykatów umożliwiłoby znaczną poprawę własności mechanicznych i użytkowych wyrobów finalnych oraz obniżyłoby koszty produkcji. W przypadku wykonania części uźebrowanych metodami obróbki skrawaniem z płyt prostopadłościennych generowane są duże straty materiałowe dochodzące do ok. 80%, które można zmniejszyć do 10–20% stosując odkuwki jako półfabrykaty. Należy nadmienić, że w przypadku stopów magnezu z powodu ich małej plastyczności trudno jest wykonać odkuwki płaskie z cienkimi i wysokimi żebrami stosując tradycyjne metody obróbki plastycznej takie jak, wyciskanie i kucie matrycowe.

Uwzględniając zapotrzebowanie przemysłu lotniczego na wyroby uźebrowane ze stopów magnezu oraz występujące problemy przy produkcji takich części za celowe uznano podjęcie tematu i opracowanie nowej, efektywnej technologii wytwarzania omawianej grupy wyrobów, która zapewni dobre własności mechaniczne i niskie koszty wytwarzania. Takie możliwości kształtowania odkuwek z cienkościennymi i wysokimi żebrami stwarza zastosowanie trójsuwakowej prasy kuźniczej, której prototyp zaprojektowano i skonstruowano w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej w Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Prasa ta, charakteryzująca się trzema ruchomymi narzędziami roboczymi, posiada możliwości technologiczne znacznie przewyższające typowe maszyny kuźnicze. Założono, że dzięki zastosowaniu tej maszyny zmniejszy się koszt produkcji gotowej części uźebrowanej poprzez znaczące obniżenie zużycia materiału i zmniejszenie pracochłonności procesu. Uzasadnia to podjęcie badań i analiz dotyczących parametrów technologicznych procesów kucia takich elementów. Przyjętą koncepcję badań własnych przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1 Harmonogram przeprowadzonych badań własnych

Opracowanie zostało podzielone na osiem rozdziałów. W pierwszym rozdziale we wprowadzeniu przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematyki pracy oraz zaprezentowano harmonogram przeprowadzonych badań własnych. W rozdziale drugim dokonano analizy literaturowej stanu zagadnienia.

Scharakteryzowano obszar zastosowań w przemyśle wyrobów płaskich z żebrami oraz główne metody ich wytwarzania. Dokonano ogólnej charakterystyki stopów magnezu, ich własności i zastosowania. Przybliżono również podstawowe wiadomości z zakresu kształtowania plastycznego stopów magnezu metodą kucia. W rozdziale trzecim przedstawiono własności wybranych stopów magnezu wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań plastometrycznych oraz warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania plastycznego. Rozdział czwarty zawiera analizę teoretyczną nowych procesów kształtowania plastycznego odkuwek z żebrami ze stopów magnezu. Opisano w nim koncepcje kucia wyrobów uźebrowanych w trójsuwakowej prasie kuźniczej oraz przedstawiono wyniki badań teoretycznych założonych procesów przeprowadzonych przy wykorzystaniu MES. Rozdział piąty poświęcono doświadczalnej weryfikacji opracowanych procesów kształtowania odkuwek z żebrami ze stopów magnezu, które zrealizowano w trójsuwakowej prasie kuźniczej w warunkach laboratoryjnych. W rozdziale szóstym opisano przeprowadzone badania jakościowe dla ukształtowanych odkuwek z żebrami ze stopów magnezu. Rozdział siódmy przedstawia przykłady procesów wytwarzania wyrobów uźebrowanych ze stopów magnezu. W rozdziale ósmym zawarto podsumowanie i wnioski końcowe.

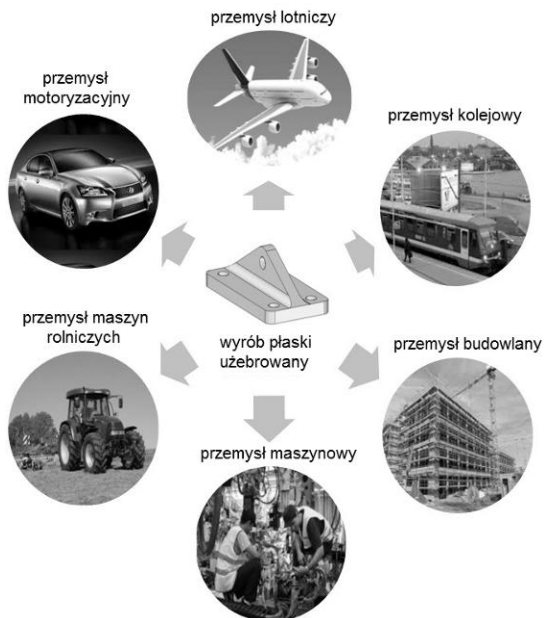
Książka przeznaczona jest dla pracowników oraz studentów wyższych uczelni technicznych, którzy prowadzą badania dotyczące kształtowania plastycznego stopów magnezu, a także interesują się niekonwencjonalnymi metodami kucia. Przedstawione treści mogą być wykorzystane również jako materiał dydaktyczny wspomagający wykłady oraz przy pisaniu prac przejściowych i dyplomowych. Z uwagi na technologiczny charakter części badań, opracowanie przeznaczone jest także dla inżynierów pracujących w zakładach kuźniczych oraz zakładach produkujących konstrukcje, w których wykorzystywane są części ze stopów magnezu.

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

W tej części pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat własności stopów magnezu oraz obecnie stosowanych metod wytwarzania wyrobów z żebrami. Przegląd obejmował specjalistyczne opracowania naukowe oraz aktualną ofertę producentów części uźebrowanych i stopów magnezu. Na początku wskazano zastosowanie wyrobów płaskich z żebrami w przemyśle. Po czym omówiono obecnie stosowane metody wytwarzania części posiadających żebra. Następne treści dotyczą charakterystyki stopów magnezu pod względem ich własności. Przedstawiono główne obszary aplikacji tych stopów w przemyśle. Kształtowanie plastyczne stopów magnezu przedstawiono na przykładzie procesu kucia, który postanowiono wykorzystać do opracowania nowej metody kształtowania odkuwek płaskich z żebrami będącej przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej.

2.1 Zastosowanie wyrobów płaskich z żebrami w przemyśle

Wyroby płaskie z żebrami znajdują szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak: przemysł lotniczy, motoryzacyjny, budowlany i inne. Na rysunku 2.1 przedstawiono najważniejsze obszary wykorzystania wyrobów uźebrowanych.

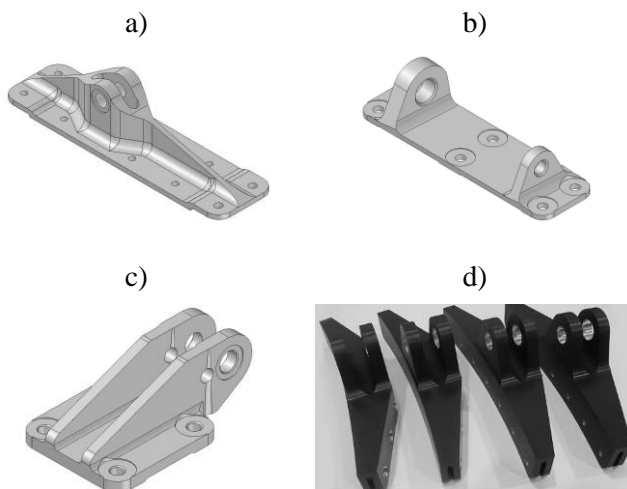


Rys. 2.1. Zastosowanie wyrobów płaskich z żebrami w przemyśle

Znaczna ich część jest wykorzystywana przez przemysł lotniczy. Na potrzeby lotnictwa są wykonywane takie elementy płaskie z żebrami jak np. wsporniki układu sterowania (rys. 2.2), pokrywy, zasłony, kłapy itp. Analiza części maszyn latających wykazała, że w zależności od przeznaczenia i konstrukcji podzespołów, wyroby płaskie uźebrowane posiadają jedno lub większą ilość żeber. Przykładowe elementy przedstawiono na rysunku 2.3.

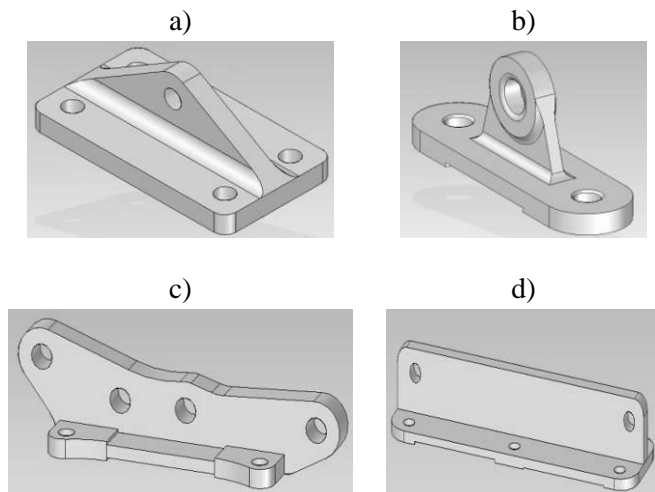


Rys. 2.2. Przykładowe wsporniki układu sterowania ze stopów magnezu wytwarzane z odlewów stosowane w budowie śmigłowców



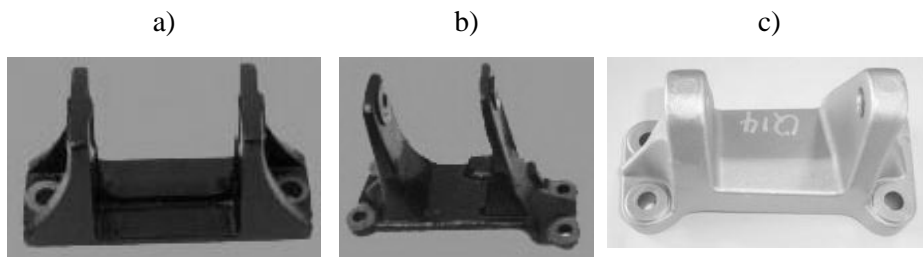
Rys. 2.3. Przykładowe wyroby płaskie z żebrami stosowane w budowie samolotów: a), b), c) z jednym i z dwoma żebrami ze stopu Mg, d) z dwoma żebrami ze stopu Al poddanego twardeму anodowaniu [61]

Żebra tych części lotniczych mogą różnić się kształtem zarysu, który jest przeważnie trójkątny, półokrągły, prostokątny lub falisty (rys. 2.4).

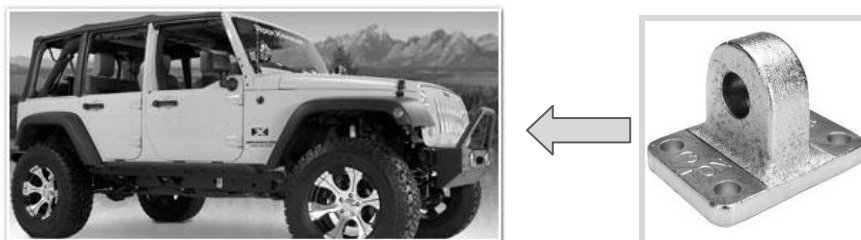


Rys. 2.4. Przykładowe części płaskie z jednym żebrzem o zarysie:
a) trójkątnym, b) półokrągłym, c) falistym, d) prostokątnym

Innym obszarem wykorzystania wyrobów posiadających żebra są konstrukcje samochodów, w których stanowią one pełną gamę wsporników: silnika, skrzyni biegów, układu napędowego itp. Przykłady takich elementów pokazano na rys. 2.5, na którym przedstawiono wsporniki mocujące silnik oraz tylnią część zawieszenia. Części te obecnie wytwarzane są metodą odlewania. W samochodach terenowych marki Jeep stosowane są wsporniki z jednym żebrzem wykonane ze staliwa (rys. 2.6).

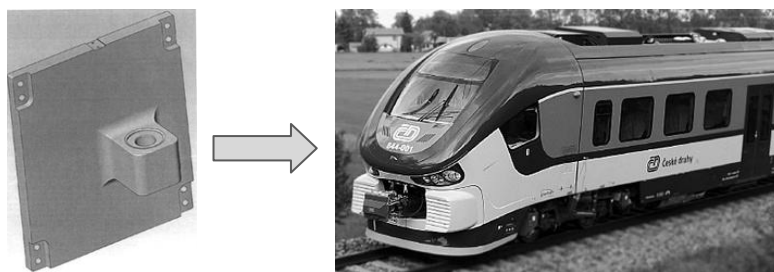


Rys. 2.5. Części samochodowe w postaci wsporników mocujących:
a, b – silnik, c – tylnią część zawieszenia [50, 52]



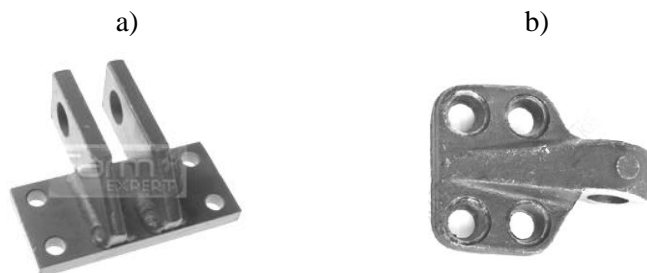
Rys. 2.6. Wspornik mocujący stosowany w konstrukcji samochodów terenowych [49]

Należy również zwrócić uwagę na zastosowanie wyrobów płaskich z żebrami w przemyśle kolejowym. Przykład takiego wyrobu pokazano na rys. 2.7, gdzie przedstawiono wspornik silnika pojazdu szynowego PESA Bydgoszcz S.A. przeznaczonego do połączenia silnika trakcyjnego z ramą wózka. Wspornik tego silnika wykonany jest z odlewu.



Rys. 2.7. Wspornik silnika pojazdu szynowego PESA Bydgoszcz SA [77]

Części z żebrami również są wykorzystywane w przemyśle rolniczym. Głównie pełnią one funkcję podpierającą w konstrukcjach maszyn rolniczych. Przykładami takich części są wsporniki: zaczepu, haka transportowego, dźwigni dolnej ciągnika Ursus, uchwytu lewego do ciągnika MTZ 1025, błotnika przedniego, siłownika podnośnika tylnego (rys. 2.8 i 2.9).

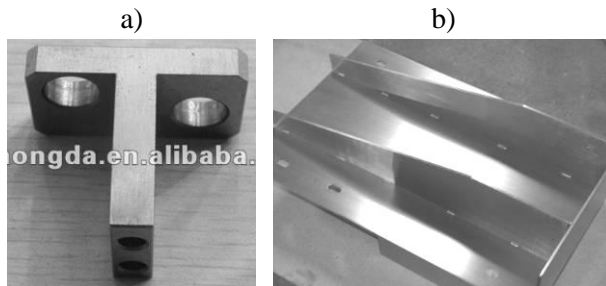


Rys. 2.8. Części płaskie z żebrami stosowane w maszynach rolniczych w postaci wspornika: a) zaczepu do ciągnika Ursus, b) uchwytu lewego do ciągnika MTZ1025 [53, 63]



Rys. 2.9. Wsporniki ciągnika rolniczego: a) siłownika podnośnika, b) błotnika przedniego [53, 63]

Elementy płaskie z żebrami są używane także w przemyśle budowlanym. Występują w postaci wszelkiego rodzaju wsporników, uchwytów, podpór itp. Na rysunku 2.10 przedstawiono po lewej stronie płaski element z jednym żebrami stosowany w budownictwie, a po prawej stronie wspornik z dwoma żebrami używany jako element wyposażenia wnętrza. Wyroby tego typu wykonywane są najczęściej technikami montażu, obróbki skrawaniem lub spajania.



Rys. 2.10. Wyroby uźebrowane stosowane w przemyśle budowlanym:
a) element ukształtowany poprzez obróbkę skrawaniem,
b) wspornik ozdobny uzyskany technologią montażu [62, 59]

2.2 Przegląd metod wytwarzania wyrobów uźebrowanych

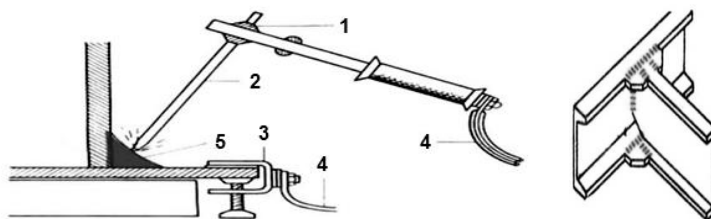
Wśród obecnych na rynku technologii wytwarzania wyrobów płaskich posiadających żebra wyróżnić można: odlewanie, obróbkę skrawaniem, nierozłączne łączenie metali oraz obróbkę plastyczną. Większość elementów uźebrowanych w warunkach przemysłu krajowego wytwarza się głównie w procesach odlewania i obróbki ubytkowej.

Najczęściej stosowaną technologią kształtowania wyrobów płaskich z żebrami jest odlewanie. Polega ono na nadaniu kształtu, wymiarów i struktury wyrobu poprzez doprowadzenie materiału do stanu ciekłego i wypełnienia nim odpowiednio przygotowanej formy odlewniczej. Ze względu na sposób zapełniania formy

odlewanie dzieli się na grawitacyjne i ciśnieniowe, natomiast z punktu widzenia rodzaju formy odróżnia się odlewanie do form jednorazowych i odlewanie do form trwałych. Przy odlewaniu metali lekkich w pewnym zakresie stosuje się również formy grafitowe i gipsowe, które z powodu większej trwałości niż formy jednorazowe są nazywane formami półtrwałymi [40, 83, 88]. Odlewy wyrobów uźebrowanych dla potrzeb lotnictwa charakteryzują się dużą dokładnością wymiarową i małą chropowatością powierzchni. Istotną wadą tej metody jest duży koszt jednostkowy odlewu, wynikający z drogiego oprzyrządowania, kosztownych materiałów formierskich i modelowych oraz znacznej energochłonności procesu. Niestety jakość otrzymanych odlewów pod względem własności wytrzymałościowych i użytkowych nie zawsze jest wystarczająca z uwagi na możliwość wystąpienia wad wewnętrznych np. pęcherzy, porowatości, jam skurczowych, rzadzizny, gruboziarnistości, niejednorodności struktury i innych.

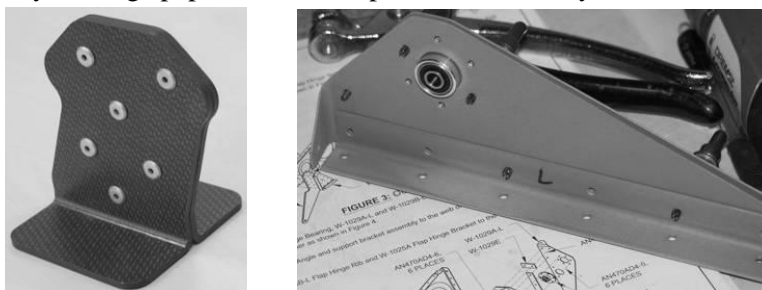
Obróbka skrawaniem wyrobów płaskich posiadających żebra polega na nadaniu żądanego kształtu, wymiarów oraz jakości powierzchni poprzez usuwanie materiału z wsadu w postaci prostopadłościanu przy użyciu narzędzi skrawających. Jest to przede wszystkim frezowanie, toczenie oraz wiercenie otworów w półfabrykatak uźebrowanych. Technologią tą można uzyskać wyroby o dużej dokładności wymiarowej z żebrami o małej grubości. Jednakże kształtowanie tą metodą wyrobów uźebrowanych wiąże się z dużymi stratami materiałowymi i czasochłonnością procesu, co z kolei przekłada się na zwiększenie ceny wyrobu finalnego.

W celu uzyskania wyrobów płaskich z żebrzem możliwe jest również zastosowanie nierozłącznych metod łączenia metali. Jest to przede wszystkim: spawanie (spawanie i zgrzewanie) oraz nitowanie. Spawanie polega na miejscowym nagraniu łączonych części, aż do stanu topliwości. Płynny metal po zakrzepnięciu tworzy trwałe integralne połączenie. Metal, który uległ stopieniu nosi nazwę spoiwy. Można wyróżnić następujące rodzaje spawania: elektryczne (rys. 2.11), gazowe i termitowe. Zgrzewanie wyrobów uźebrowanych jest procesem, przy którym części metalowe miejscowo nagrzane do stanu plastycznego są łączone za pomocą nacisku mechanicznego zasadniczo bez użycia metalu dodatkowego jako spoiwa. Rozróżniamy następujące metody zgrzewania: tarciove, oporowe, iskrowe, dyfuzyjne [91].



Rys. 2.11. Spawanie elektryczne żebra do płyty: 1 - uchwyt do elektrody, 2 - elektroda, 3 - uchwyt, 4 - przewody, 5 - spoiwa [64]

Technologie spajania charakteryzują się małą wydajnością i dużą pracochłonnością procesu, a własności elementów w okolicy łączenia są obniżone w stosunku do jednolitego materiału. Do metod nierozłącznego łączenia elementów zalicza się również nitowanie. Znalazło ono szerokie zastosowanie w budowie samolotów. Przykład stosowanego w lotnictwie wspornika z laminatu oraz z metalu lekkiego wykonanego poprzez nitowanie przedstawiono na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Elementy płaskie z jednym żebrzem uzyskane metodą nitowania [51, 60]

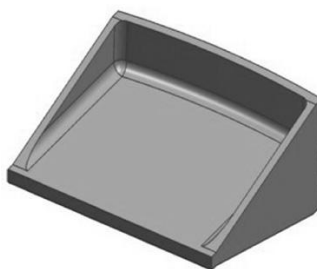
Nitowanie posiada jednak wady, do których można zaliczyć: zwiększenie ciężaru konstrukcji, osłabienie przekroju otworami nitowymi, dużą liczbę operacji i czynności technologicznych.

Wysokie własności wytrzymałościowe i jakościowe wyrobu, lepsze wykorzystanie materiału oraz zmniejszenie czasu wykonania elementu zapewniają metody obróbki plastycznej. Spośród metod kształtowania plastycznego wyrobów płaskich z żebrami można wyróżnić: kucie matrycowe na młotach i prasach, wyciskanie. Podczas kucia matrycowego wyrobów uźebrowanych wsad układa się w wykroju matrycy dolnej, a następnie pod wpływem uderzenia lub nacisku matrycy górnej materiał odkształca się i wypełnia wykrój, przyjmując jego kształt. Wyróżnia się dwa rodzaje kucia: w matrycach otwartych (z wypływką) i w matrycach zamkniętych (bezwypływkowe). Charakterystyczną cechą kucia w matrycach otwartych jest to, że materiał po wypełnieniu wykroju wypływa pomiędzy matryce tworząc wypływkę. Przy kuciu w matrycach zamkniętych materiał zużywany jest w całości na wypełnienie wykroju. Technologia kucia tradycyjnego znajduje zastosowanie tylko w przypadku kształtowania odkuwek z niższymi i grubościennymi żebrami. Przykład odkuwek uźebrowanych uzyskanych w procesie kucia matrycowego przedstawiono na rys 2.13 [101].

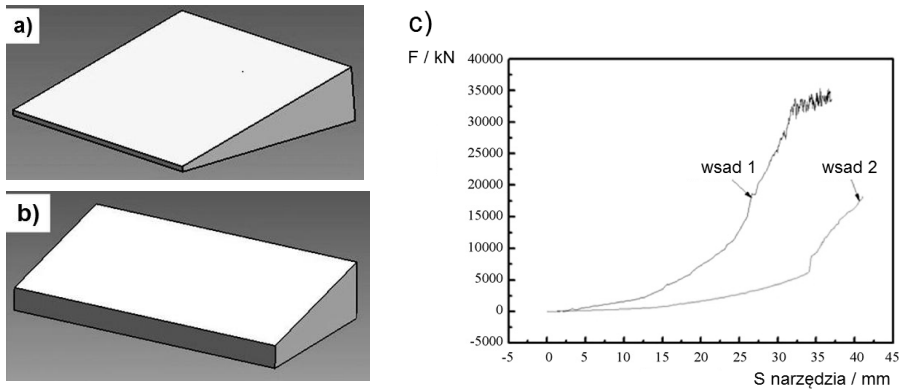


Rys. 2.13. Odkuwki uźebrowane kute matrycowo ze stopów aluminium PA31 i 2618A [101]

Badania kucia dokładnego w warunkach izotermicznych odkuwki uźebrowanej ze stopu magnezu przeprowadzili w roku 2011 naukowcy z Chin tj. Shan D., Xu W., Han X., Huang X [94]. Przedmiotem badań było kształtowanie plastyczne odkuwki płaskiej wspornika z wysokimi i cienkimi ściankami (źebami) ze stopu magnezu Mg-10Gd-2Y-0.5Zn-0.3Zr zawierającego metale ziem rzadkich (rys. 2.14). Wprowadzenie mieszaniny pierwiastków ziem rzadkich do stopu magnezu ma za zadanie zwiększenie wytrzymałości stopów magnezu w podwyższonych temperaturach. Pole powierzchni ścianki wynosi ok. $0,05 \text{ m}^2$, a grubość ścianki to ok. 8 mm. Stosunek wysokości do jej szerokości przekracza 9,5. Odkuwka o tak skomplikowanych kształtach nie może być kuta tradycyjnie, dlatego też proces realizowano poprzez kucie precyzyjne w warunkach izotermicznych. Symulację tego procesu przeprowadzono przy uźyciu komercyjnego oprogramowania DEFORM 3D opartego na metodzie elementów skończonych. Zaprojektowano wsad o rŃwnych kształtach geometrycznych dla analizowanego procesu w celu uzyskania optymalnej przedkuwki. Na rys. 2.15 a i b pokazano dwa rodzaje wsadu o rŃwnych rozmiarach uźytych do procesu kształtowania wspornika.



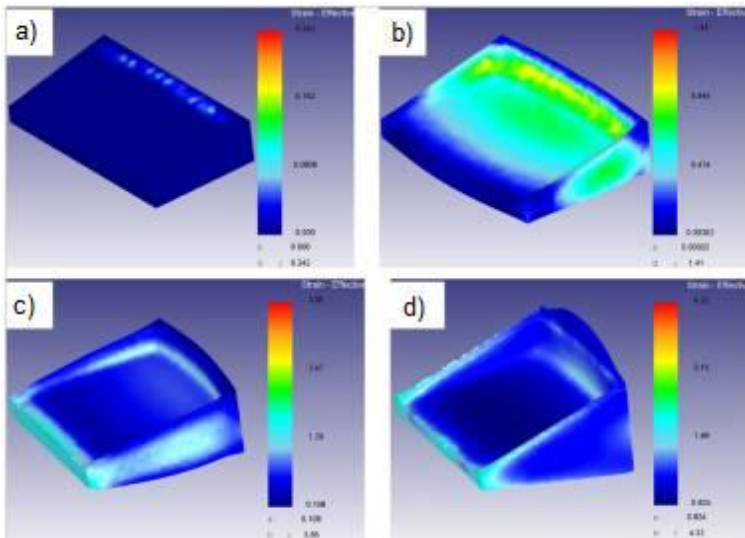
Rys. 2.14. Trójwymiarowy model uźebrowanego wspornika o wymiarach 300 mm×250 mm×150 mm (długość, szerokość, wysokość) [94]



Rys. 2.15. Zestawienie dwóch różnych wsadów użytych do procesu kucia wspornika: a), b) kształt geometryczny wsadu nr 1 i 2, c) siła kształtowania podczas kucia wsadu nr 1 i 2 [94]

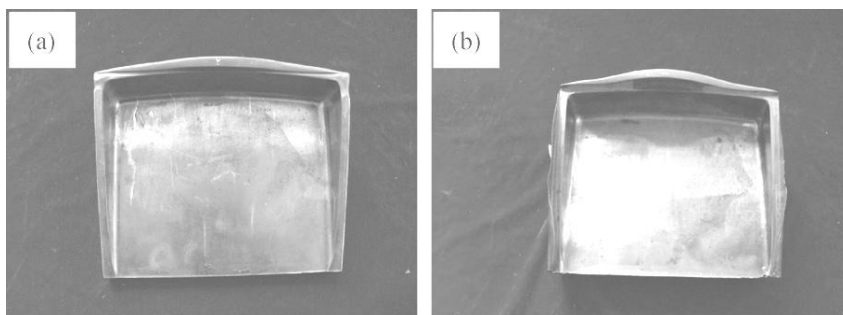
Na rysunku 2.15 c przedstawiono przebieg sił występujących w procesie kucia założonych wsadów w warunkach izotermicznych. Na podstawie wyników symulacji stwierdzono, że siły przy kształtowaniu odkuwki z wsadu nr 1 są zbyt wysokie w stosunku do wsadu nr 2. Zbyt duża wartość maksymalna siły kucia zwiększy zużycie narzędzi oraz koszt produkcji wsporników. Dlatego też wsad nr 2 został wybrany do procesu kształtowania odkuwki z cienkimi ściankami.

Na rys. 2.16 przedstawiono rozkład odkształceń kształtowanego wsadu nr 2.



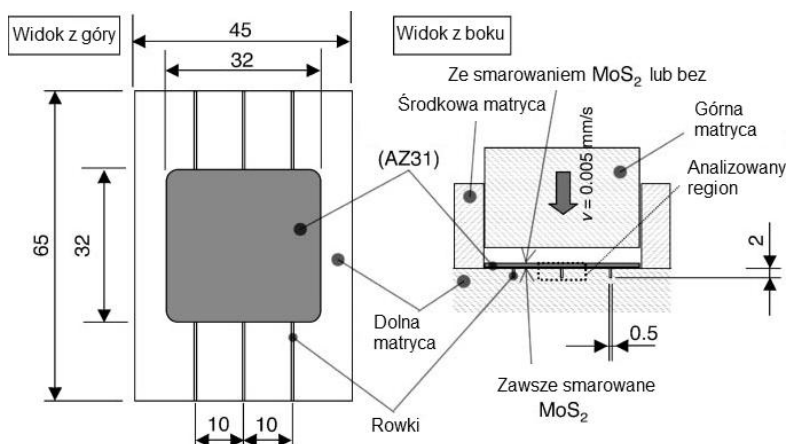
Rys. 2.16. Rozkład odkształceń podczas kształtowania wsadu nr 2 przy jego redukcji wysokości o wartość: a) 12 mm, b) 31,5 mm, c) 34 mm i d) 36,7 mm [94]

Badania doświadczałne kucia w warunkach izotermicznych wspornika przeprowadzono na prasie hydraulicznej o nacisku 50,000 kN. Temperatura podgrzewania narzędzi i wsadu wynosiła 680 K (ok. 407°C). Jako środek smarny zastosowano grafit koloidalny rozmieszany z wodą. Na rys. 2.17 przedstawiono odkawkę wspornika ukształtowaną podczas badań doświadczałnych przy różnym nacisku. Przy wartości siły kucia 18000 kN ścianki zostały uformowane w znacznej części, ale ich grubość nie spełniła wymogów, jak pokazano na rys. 2.17 a. W celu poprawy jakości wypełnienia wykroju zwiększono siłę do 25000 kN, dzięki czemu został całkowicie wypełniony przez materiał, a grubość ścianek zredukowano do 8 mm (rys. 2.17 b).



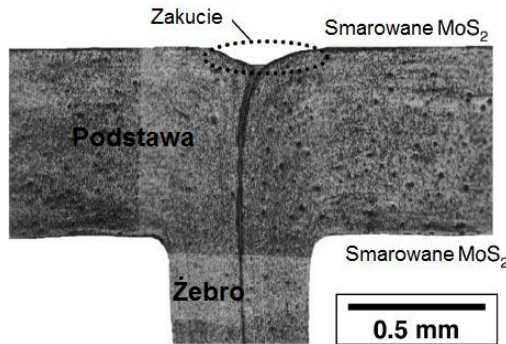
Rys. 2.17. Fotografia odkuwki wspornika ze stopu magnezu ukształtowana przy zastosowaniu siły: a) 18000 kN i b) 25000 kN [94]

Interesujące rozwiązanie w zakresie procesu kucia płyty z żebrami ze stopu magnezu AZ31 przedstawił zespół badaczy z Japonii [100]. Kucie matrycowe przeprowadzili na prasie hydraulicznej w warunkach izotermicznych w temperaturze ok. 350°C ze stałą prędkością 0,005 mm/s. Schemat założonego procesu przedstawiono na rys. 2.18.



Rys. 2.18. Schemat procesu kucia płyty z trzema żebrami ze stopu AZ31 [100]

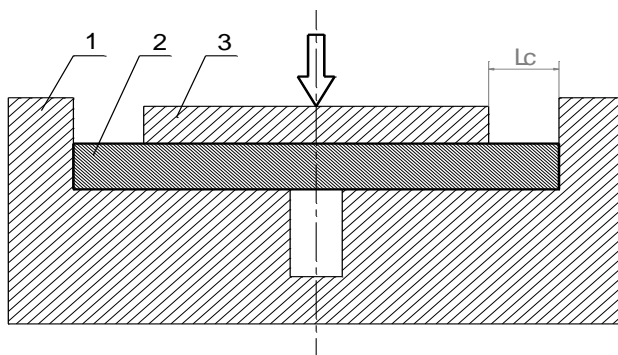
Rozważano dwa warianty procesu: kształtowanie bez smarowania górnej powierzchni wsadu oraz kształtowanie ze smarowaniem tej powierzchni dwusiarczkiem molibdenu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że na jakość ukształtowanego wyrobu duży wpływ mają warunki tarcia. Dla procesu prowadzonego ze smarowaniem uzyskano wyrób wadliwy z zakuciem pod żebrami przedstawionym na rys. 2.19. Natomiast przy kuciu bez smarowania otrzymano wyrób prawidłowy z płaską powierzchnią pod żebrami. Uzębrowane płyty ze stopu AZ31 wytwarzane przy zastosowaniu tej technologii charakteryzują się żebrami o niewielkich rozmiarach tj. wysokości 2 mm i szerokości 0,5 mm.



Rys. 2.19. Zakucie pod żebrem ukształtowanego wyrobu [100]

Metoda kształtowania plastycznego wyrobów z żebrami poprzez wyciskanie polega na poddawaniu materiału umieszczonego w pojemniku komory naciskowi stempla, pod wpływem którego wypływa on przez otwór matrycy o kształcie ściśle odpowiadającym przekrojowi poprzecznemu wyrobu uzębrowanego [83]. W zależności od kierunku płynięcia materiału w stosunku do ruchu stempla rozróżnia się wyciskanie współbieżne, przeciwbieżne, poprzeczne, mieszane, specjalne (hydrostatyczne, tiksotropowe). Przy wyciskaniu wyrobów uzębrowanych niewątpliwym ograniczeniem jest występowanie dużych sił kształtowania, przy których zachodzi znaczne zużycie narzędzi.

Z opracowań literaturowych na uwagę zasługuje również sposób kształtowania plastycznego elementów w kształcie litery T [106]. Schemat procesu pokazano na rysunku 2.20.



Rys. 2.20. Schemat kształtowania wyrobów w kształcie litery T: 1 - matryca, 2 - wsad, 3 - stempel, L_c – szerokość szczeliny [106]

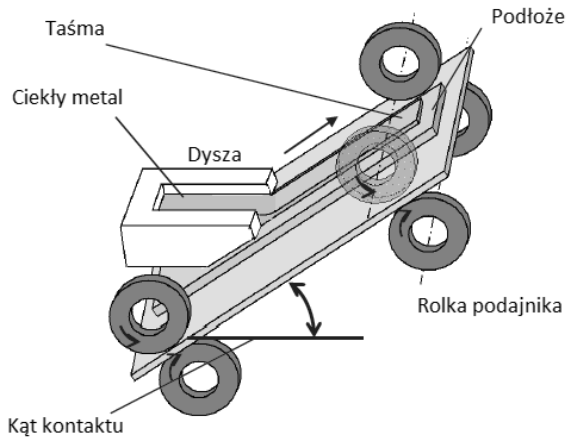
Metoda ta jest przeanalizowana na przykładzie kształtowania stopów tytanu w temperaturze 950°C , przy czym podgrzewa się zarówno wsad jak i narzędzia. Wsad (2) umieszczony jest w dolnej matrycy (1). Stempel (3) poruszając się w kierunku zaznaczonym strzałką wywiera nacisk na wsad, który wypełnia szczelinę w dolnej matrycy oraz wypływa szczelinami bocznymi o szerokości L_c , utworzonymi przez stempel i pionowe ściany narzędzia dolnego. Na rys. 2.21 przedstawiono przekrój poprzeczny elementu w kształcie litery T. Kształtowanie wyrobów uźebrowanych analizowaną metodą nie jest jednak efektywne, gdyż duża część materiału wypływa przez szczeliny boczne, co ogranicza wzrost formowanego żebra dolnego. Istnieje pewna krytyczna wartość szerokości stempla, poniżej której wypełnienie szczeliny matrycy dolnej będzie niewielkie a prawie cały materiał wypłynie przez szczeliny boczne. Ukształtowane żebra boczne i dolne posiadają nieregularny kształt (rys. 2.21), co należy uznać za zjawisko niekorzystne.



Rys. 2.21. Przekrój poprzeczny elementu w kształcie litery T [106]

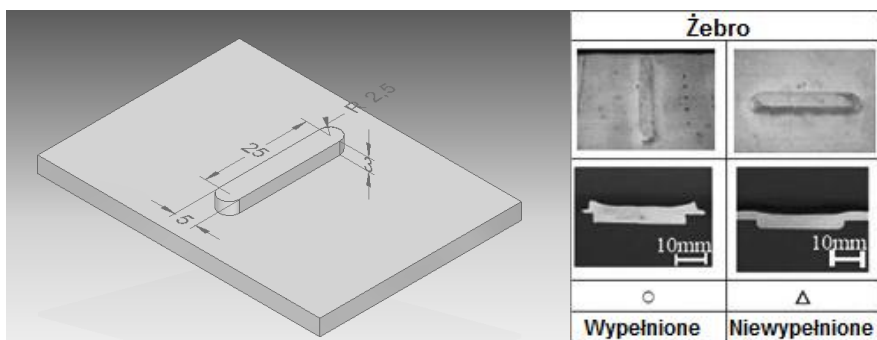
Technologię wytwarzania elementów płaskich z żebrami przedstawiono na przykładzie opracowania S. Nishida, K. Fukudome, J. Kudo. W pracy [82] zaproponowano proces kształtowania wyrobów ze stopu magnezu w stanie ciekłym metodą nakładania przy użyciu urządzenia do szybkiej produkcji taśm z żebrami i występami. Prototyp urządzenia składa się z podstawy, która jest

nachylona do poziomu pod odpowiednim kątem. Przy podłożu umieszczona została dysza, którą napełnia się ciekłym metalem. Następnie podstawa wprawiana jest w ruch poprzez rolki, co powoduje ruch podłoża w górę i powstanie na nim taśmy. Na górnej powierzchni podłoża formowane jest zebro, które jest jeszcze dodatkowo obrabiane. Jako że stopiony magnez jest bardzo aktywny urządzenie to musi być dokładnie osłonięte. Dla większego bezpieczeństwa istnieje możliwość stosowania gazów ochronnych. Schemat procesu kształtowania taśmy z żebrami pokazano na rys. 2.22.



Rys. 2.22. Proces kształtowania taśmy z żebrami i występami [82]

Na rysunku pokazano kształt i rozmiar wyrobu płaskiego z żebrami otrzymanego metodą nakładania w stanie ciekłym. Należy zwrócić uwagę na małą wysokość żebra, która jest równa 3 mm. Pozostałe wymiary wynoszą: szerokość 5 mm i długość 30 mm. Optymalne warunki procesu, w którym następuje kompletne wypełnienie podłoża to temperatura metalu $t = 810^{\circ}\text{C}$ i prędkość podłoża $v = 5 \text{ m/min}$. Jest to tak zwane wolno zestalone wypełnienie, które odbywa się przy wysokich temperaturach metalu i niskich prędkościach podłoża. Rozgrzanie metalu do temperatury powyżej 840°C powoduje jego niestabilność. Czas wypełnienia wpływa na kontakt pomiędzy metalem a podłożem w dyszy oraz zdolność płynięcia stopionego metalu. Wypełnienie żebra może odbywać się na dwa sposoby w zależności od położenia żebra. Można uzyskać zebro ustawione poprzecznie do kierunku przemieszczenia podłoża lub zebro ustawione zgodnie z kierunkiem poruszania się podłoża. Zebro poprzeczne odznacza się dokładniejszym wypełnieniem, natomiast zebra wzdłużne posiadają wadę niepełnego wypełnienia głowy żebra. Przykładowe elementy wytwarzane przy zastosowaniu tej technologii pokazano na rys. 2.23, na którym można zauważyć, że tą metodą uzyskuje się zebra o niewielkich rozmiarach.



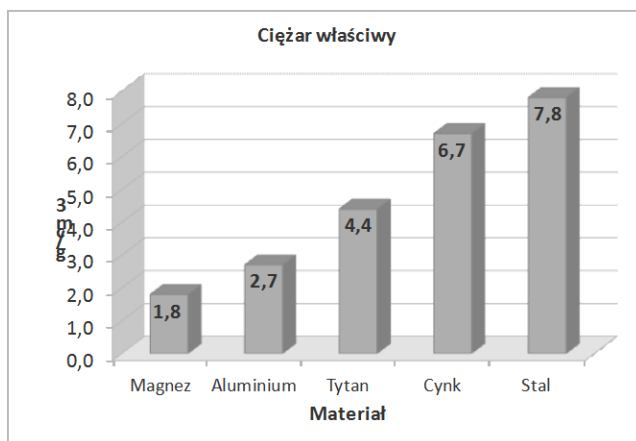
Rys. 2.23. Schematyczna ilustracja kształtu żebra [82]

2.3 Ogólna charakterystyka stopów magnezu

2.3.1 Własności stopów magnezu

Magnez oraz jego stopy należą do najlżejszych materiałów konstrukcyjnych (o 75% procent lżejsze niż stal i o 33% procent lżejsze niż aluminium) (rys. 2.24). Jego gęstość wynosi ok. $1,8 \text{ g/cm}^3$. Temperatura topnienia Mg osiąga wartość 650°C , a temperatura wrzenia 1107°C [24]. Jest trzecim pierwiastkiem pod względem ilości w wodzie morskiej, w skorupie ziemskiej ósmym, we wszechświecie dziewiątym, a w organizmie człowieka jedenastym (ok. 24 g). W wodzie morskiej występuje w ilości około 1200 ppm, co oznacza że w 1 km^3 tej wody znajduje się około 1,5 miliona ton czystego metalu. Magnez w skorupie ziemskiej występuje w ilości 2,74% w postaci minerałów, wśród których znajdują się: dolomit, magnezyt, kizeryt, biszofit, karnalit, kainit i szenit. Czysty magnez jest rzadko stosowany ze względu na znaczną podatność do utleniania, miękkość i niskie własności mechaniczne [97]. W przemyśle większe zastosowanie mają stopy magnezu.

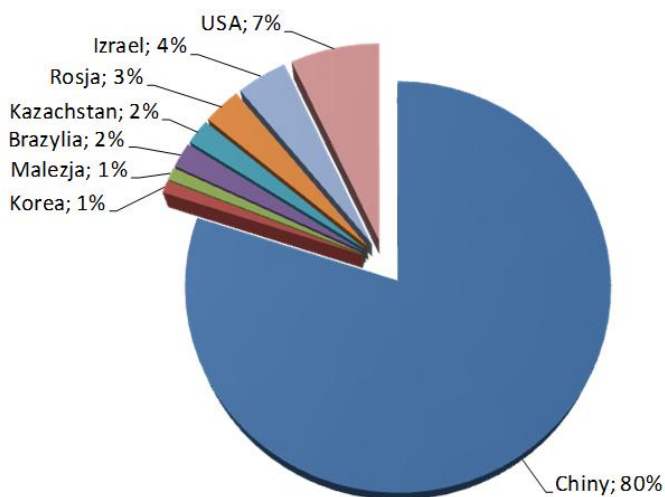
2. Analiza stanu zagadnienia



Rys. 2.24. Wykres zależności gęstości od rodzaju materiału

Według International Magnesium Association w 2013 r. wyprodukowano $850 \cdot 10^3$ Mg magnezu [47]. Udział poszczególnych państw w produkcji tego metalu przedstawiono na rys. 1.25. Głównymi producentami magnezu są Chiny, a następnie USA i Izrael. Największym odbiorcą produkcji magnezu jest przemysł lotniczy, motoryzacyjny, elektroniczny i sportowy [68, 74]. Przemysłowe zainteresowanie stopami magnezu wynika z jego szczególnych właściwości, odróżniających go od powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych, głównie:

- bardzo małej gęstości,
- stosunkowo dobrej wytrzymałości (R_m do 360 MPa) i sztywności w pokojowej i podwyższonej temperaturze,
- znakomitej stabilności wymiarowej,
- dobrej zdolności tłumienia drgań,
- odporności na szoki cieplne,
- dobrej obrabialności skrawaniem,
- dobrej lejućności oraz dobrej spawalności w kontrolowanych atmosferach,
- odporności na działanie roztworów silnie alkalicznych,
- odporności na wgniatanie,
- małej absorpcji promieniowania X oraz neutronów [5, 20, 68].



Rys. 2.25. Udział państw w produkcji magnezu w 2013 roku [47]

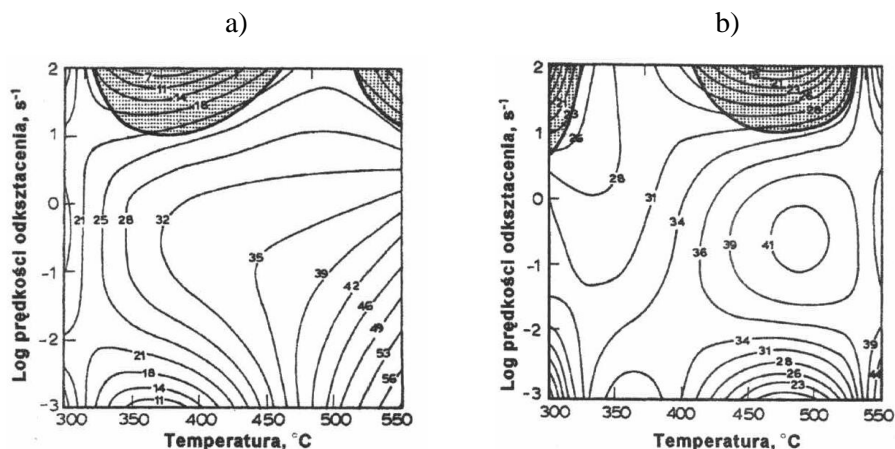
Pomimo korzystnych właściwości stopów magnezu wymienionych powyżej ich zastosowanie w przemyśle jest znacznie ograniczone poprzez takie czynniki jak:

- mała odporność na korozję,
- mała plastyczność, wąski zakres parametrów temperaturowych kształtowania oraz czułość na prędkość odkształcenia (w efekcie pękanie przy odkształceniach plastycznych),
- skłonność do zapalania się w kontakcie z tlenem i parą wodną,
- wysokie ceny surowców,
- wysokie koszty przetwarzania metodami obróbki plastycznej ze względu na konieczność posiadania specjalistycznej aparatury dostosowanej do stopów magnezu [42].

Głównym wskazanym powyżej mankamentem zastosowania stopów magnezu jest ich wysoka podatność na korozję naprężeniową. W otoczeniu atmosfery pokrywają się ochronną warstwą tlenków, która nie tworzy tak ścisłej struktury jak w przypadku aluminium. W związku z tym warstewka ta nie chroni podłoża przed korozją. Aby zapobiec korozji stopów magnezu stosuje się obróbkę powierzchniową, która polega na wytwarzaniu galwanicznych powłok metalowych lub powłok konwersyjnych, które pokrywane są lakierami.

Drugim istotnym problemem rozwoju stopów magnezu jest ich niska odkształcalność w temperaturze otoczenia, co jest związane z budową krystaliczną magnezu, który ma strukturę heksagonalną z aktywnym tylko jednym systemem poślizgu w płaszczyźnie (0001). W związku z tym stopy Mg są kształtowane na gorąco w temperaturze powyżej $200\div 225^{\circ}\text{C}$, gdy zostają uaktywnione dodatkowe płaszczyzny poślizgu (skośna i tetragonalna) [43]. Zakres temperatur i prędkości odkształcenia czystego magnezu, w których możliwa jest obróbka

plastyczna tego materiału przedstawiono na przykładzie map odkształcalności autorstwa Y.V.R.K. Prasada [90]. Na rys. 2.26 zaznaczono jasnym obszarem zakres wartości temperatur i prędkości odkształcenia, dla których występuje dobra odkształcalność dla magnezu uzyskanego metodą odlewniczą oraz w procesie wyciskania.



Rys. 2.26. Mapy odkształcalności dla czystego magnezu: a) struktura odlewnicza, b) materiał wyciskany [90]

Ogólnie ze względu na przeznaczenie technologiczne stopy magnezu można podzielić na stopy odlewnicze oraz do przeróbki plastycznej. W Polsce system oznaczenia magnezu i jego stopów według składu chemicznego podaje norma PN-EN 1754:2002. Odlewnicze stopy magnezu ujęto w normie PN-EN 1753:2001. Natomiast stopy do obróbki plastycznej zawarto w wycofanej bez zastąpienia normie PN-H-88051:1964. Często w przemyśle do oznaczania stopów magnezu jest stosowany amerykański system, zatwierdzony przez organizację standaryzującą ASTM (The American Society for Testing and Materials), zaproponowany w normie ASTM B951-10. Oznaczenie stopów magnezu składa się z ciągu znaków np. dla AZ31: litery oznaczają podstawowe składniki stopowe, natomiast cyfry ich udział masowy. Właściwości mechaniczne stopów magnezu po przeróbce plastycznej są lepsze niż stopów odlewniczych. Te pierwsze są przedmiotem prowadzonych rozważań.

Stopy magnezu do kształtowania plastycznego można podzielić na trzy zasadnicze grupy: pierwsza z dodatkiem aluminium oraz cynku i manganu, druga zawierająca głównie pierwiastki Zn, Re, Y, Zr, Th oraz trzecia zawierająca ultralekki Li (rys. 2.27) [42].

Najczęściej dodawanymi pierwiastkami do stopów magnezu są aluminium, cynk i mangan. Najkorzystniejszy wpływ na własności stopów Mg ma aluminium (Al),

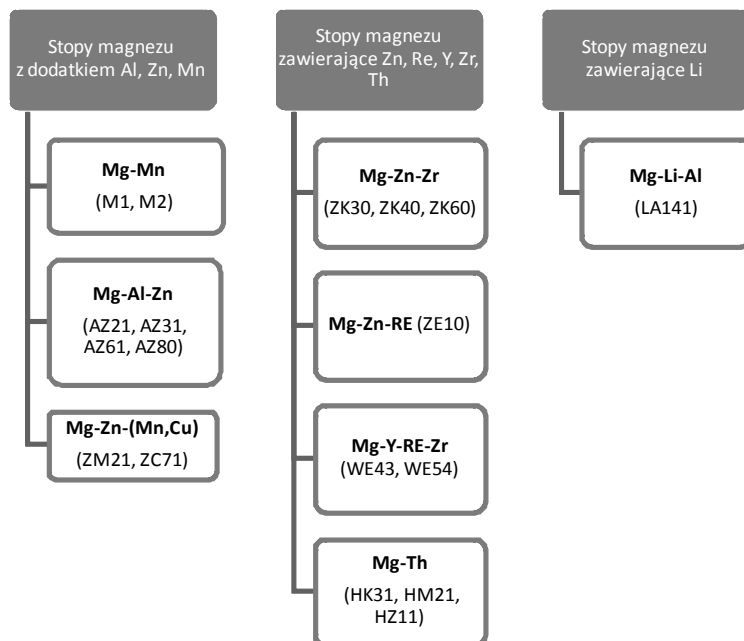
które podwyższa ich wytrzymałość i twardość. Drugim po aluminium pod względem skuteczności składnikiem stopowym jest cynk (Zn). Wpływa on na drobnoziarnistość stopu, podnosi wytrzymałość i plastyczność. Zwykle jest dodawany łącznie z aluminium i manganem. Mangan (Mn) zwiększa wytrzymałość na pękanie oraz polepsza odporność na korozję tworząc z żelazem związek międzymetaliczny. Do najpopularniejszych stopów magnezu do obróbki plastycznej z tej grupy należą stopy Mg-Al-Zn takie jak AZ31, AZ61 i AZ80, które w przemyśle są wykorzystywane na skalę podobną do stopów odlewniczych. Zastosowanie stopów AZ31 w przemyśle ogranicza się na części pracujące do temperatury ok. 95°C.

Stopy magnezu w zależności od wymaganych właściwości mogą zawierać także inne pierwiastki np. krzem (Si), metale ziem rzadkich (RE), itr (Y), cyrkon (Zr) oraz tor (Th). Krzem podwyższa odporność na pękanie, zaś obniża odporność na korozję. Metale ziem rzadkich zwiększają wytrzymałość stopów magnezu w podwyższonych temperaturach. Nadają stopom odporność na pękanie. Itr jest dodawany w celu zwiększenia odporności na pękanie w podwyższonych temperaturach oraz poprawia własności wytrzymałościowe i odporność korozyjną. Cyrkon oddziałuje bardzo efektywnie na rozdrabnianie ziaren, co wpływa na poprawę własności plastycznych. Nie może być natomiast dodawany do stopów zawierających aluminium lub mangan, z którymi tworzy stabilne związki. Tor w wysokim stopniu zwiększa odporność na pękanie, opóźnia spadek własności wytrzymałościowych ze wzrostem temperatury. Z tej grupy popularnymi stopami magnezu do zastosowań w wyższych temperaturach są stop zawierający tor tj. HK31 i HM21.

W ostatnim czasie rośnie również zainteresowanie bardzo lekkimi stopami Mg-Li-Al, w których lit obniża gęstość do 1,3 g/cm³ oraz poprawia znacznie plastyczność, jednakże bardzo pogarsza odporność korozyjną.

W tabeli 2.1 i 2.2 przedstawiono skład chemiczny wybranych stopów magnezu przeznaczonych do obróbki plastycznej oraz ich własności mechaniczne.

2. Analiza stanu zagadnienia



Rys. 2.27. Podział stopów magnezu do obróbki plastycznej

Tab. 2.1. Skład chemiczny wybranych stopów magnezu do przeróbki plastycznej z aluminium i cynkiem [5, 68]

Oznaczenie stopu	Stężenie pierwiastków stopowych [%]								
	Mg	Al	Zn	Fe	Mn	Ni	Si	Cu	inne
AZ31	94,35–96,1	2,5–3,5	0,7–1,3	0,005	0,2–0,35	0,005	0,1	0,04	0,35
AZ61	93,19–90,49	5,8–7,2	0,4–1,5	0,005	0,15–0,35	0,005	0,1	0,05	0,3
AZ80	91,59–90,14	7,6–8,4	0,3–0,7	0,02	0,15–0,4	0,01	0,01	0,02	0,3
AZ91	90,6–89,72	8,7–9,2	0,54–0,68	0,009	0,12–0,33	0,001	0,01–0,04	0,01	0,01 C

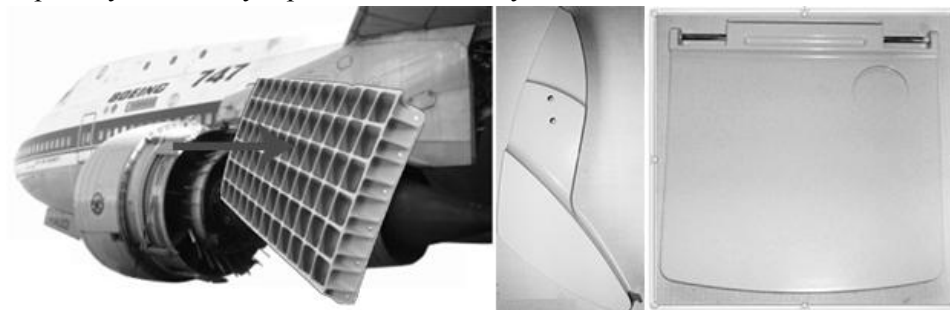
Tab. 2.2 Własności mechaniczne wybranych stopów magnezu z aluminium i cynkiem [5, 68]

Oznaczenie stopu	R _m [MPa]	R _e [MPa]	Wydlużenie [%]	Twardość [HB]	Wytrzymałość na ścinanie	Wytrzymałość na ściskanie
AZ31B *	260	170	16	50	130	-
AZ61A-F*	295	180	12	55	145	125
AZ80A*	345	250	6	72	160	170
AZ91B**	275	145	6	70	-	-
* - właściwości dla odkuwek						
** - właściwości dla materiału odlewane go w formach piaskowych, starzone go						

2.3.2 Zastosowanie stopów magnezu w przemyśle

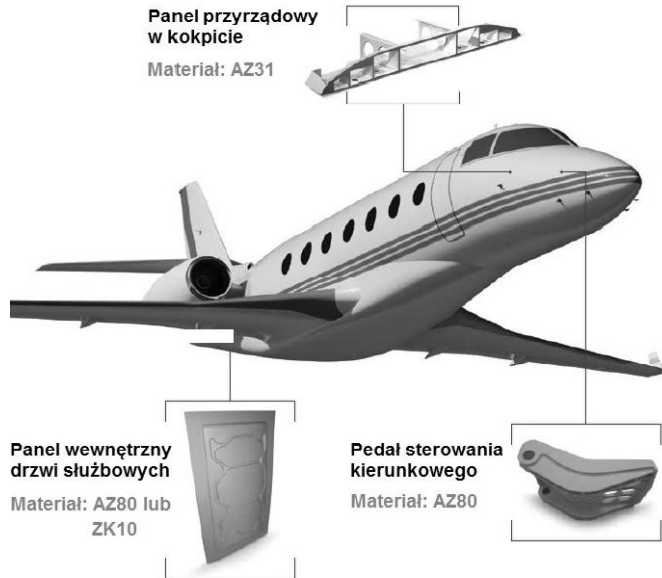
Stopy magnezu należą do grupy metali lekkich o szerokim spektrum zastosowania. Wykorzystuje się je m.in. w przemyśle lotniczym, zbrojeniowym, motoryzacyjnym, elektronicznym, włókienniczym, sportowym, medycznym w budownictwie i innych [68, 74, 87].

W lotnictwie ze stopów magnezu wykonuje się pełną gamę elementów konstrukcyjnych, od części do skrzyni biegów, części silnika, odlewów skrzyni przekładniowych, skrzydeł, poszyc kadłubów, drzwi, kół, podwozia, paneli desek rozdzielczych, elementów siedzeń. Przykładowo w samolocie Boeing 727 występuje około 1200 części magnezowych. Zastosowanie stopów magnezu w przemyśle lotniczym przedstawiono na rys. 2.28 i 2.29 [47, 74, 87].

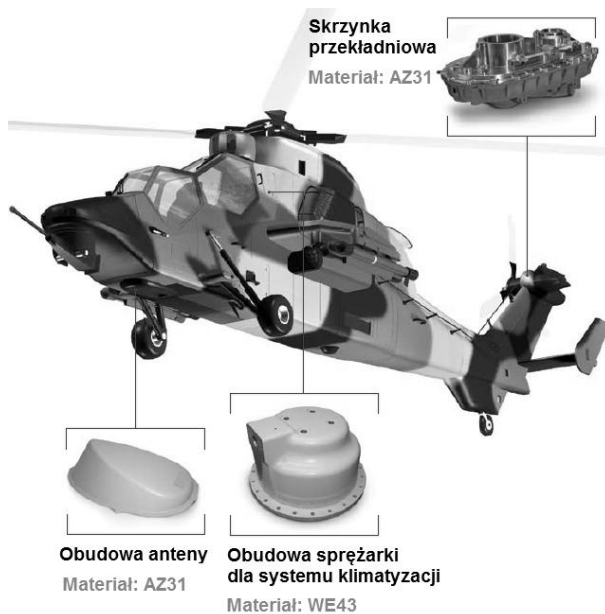


Rys. 2.28. Przykłady zastosowań stopów magnezu w samolocie Boeing 747: elementy skrzydeł i siedzeń [47]

2. Analiza stanu zagadnienia



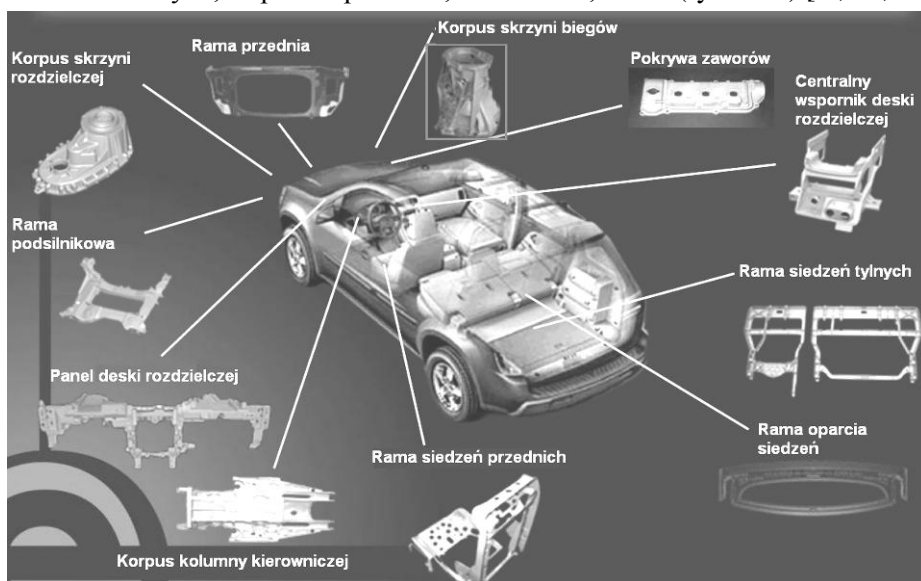
Rys. 2.29. Zastosowanie stopów magnezu w lotnictwie [2]



Rys. 2.30. Zastosowanie stopów magnezu w przemyśle zbrojeniowym [2]

Stopy magnezu wykorzystuje się w przemyśle zbrojeniowym do produkcji elementów helikopterów wojskowych (rys. 2.30) oraz sprzętu militarnego, takiego jak podstawy moździerz, ramy namiotów i schronów, pociski i rakiety.

W przemyśle motoryzacyjnym coraz więcej części pojazdów samochodowych wytwarzanych jest ze stopów magnezu. Związane jest to z dyrektywami Unii Europejskiej dotyczącymi oszczędności energii, w tym paliw. Poprzez zastosowanie stopów magnezu w konstrukcji samochodów możliwe jest zmniejszenie wagi całej maszyny, a w konsekwencji obniżenie zużycia paliwa. Zredukowanie masy o 100 kg daje w rezultacie oszczędność do 0,4 litra paliwa na 100 km jazdy [20]. Wykonywane części w przemyśle samochodowym to: elementy silnika i karoserii, pokrywy głowic cylindrów, szkielety siedzeń i okien dachowych, wspornik pedałów, kierownica, i inne (rys. 2.31) [9, 74, 87].



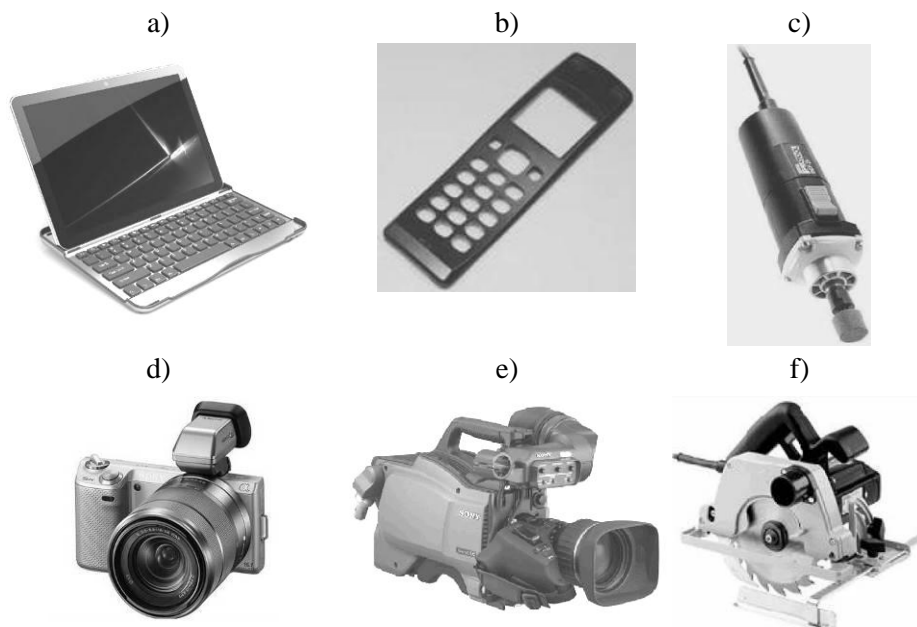
Rys. 2.31. Przykłady zastosowań stopów magnezu w motoryzacji [41]

Stopy magnezu w przemyśle elektronicznym najczęściej stosuje się na obudowy sprzętu elektronicznego z uwagi na dwie bardzo istotne właściwości: niską wagę oraz zabezpieczenie przed promieniowaniem elektromagnetycznym [58]. W seryjnej produkcji z tych stopów wytwarzane są obudowy: laptopów, telefonów komórkowych, aparatów fotograficznych, kamer cyfrowych (rys. 1.32 a, b, d, e) [93]. Dodatkowo stopy Mg wykorzystuje się do produkcji elektronarzędzi ze względu na właściwości tłumienia drgań (rys. 2.32 c, f).

W budownictwie stopy magnezu znajdują zastosowanie w konstrukcjach okien, klamkach okiennych i drzwiowych, ryglach, szyldach drzwiowych, akcesoriach dekoracyjnych i innych [93].

W przemyśle włókienniczym stopy na bazie magnezu używane są na gniazda krosien tkackich i wysokoobrotowych części, takich jak: cewki, szpule, obsady szczotkowe [93].

Ważnym obszarem aplikacji stopów magnezu jest medycyna. Ze stopów magnezu wytwarza się implanty, klamry do łączenia kości, nici chirurgiczne (rys. 2.33) [47, 87, 96 104]. Zaletą zastosowania tych stopów polega głównie na zdolności rozpuszczenia się wymienionych elementów w organizmie ludzkim. Zarówno magnez i wapń występują w organizmie i są całkowicie bezpieczne. Takie wykorzystanie stopów magnezu zapobiega konieczności wykonania kolejnej operacji usunięcia implantu z ciała pacjenta. Zmniejszenie ilości ingerencji w ciało ludzkie, w każdym przypadku jest korzystne.

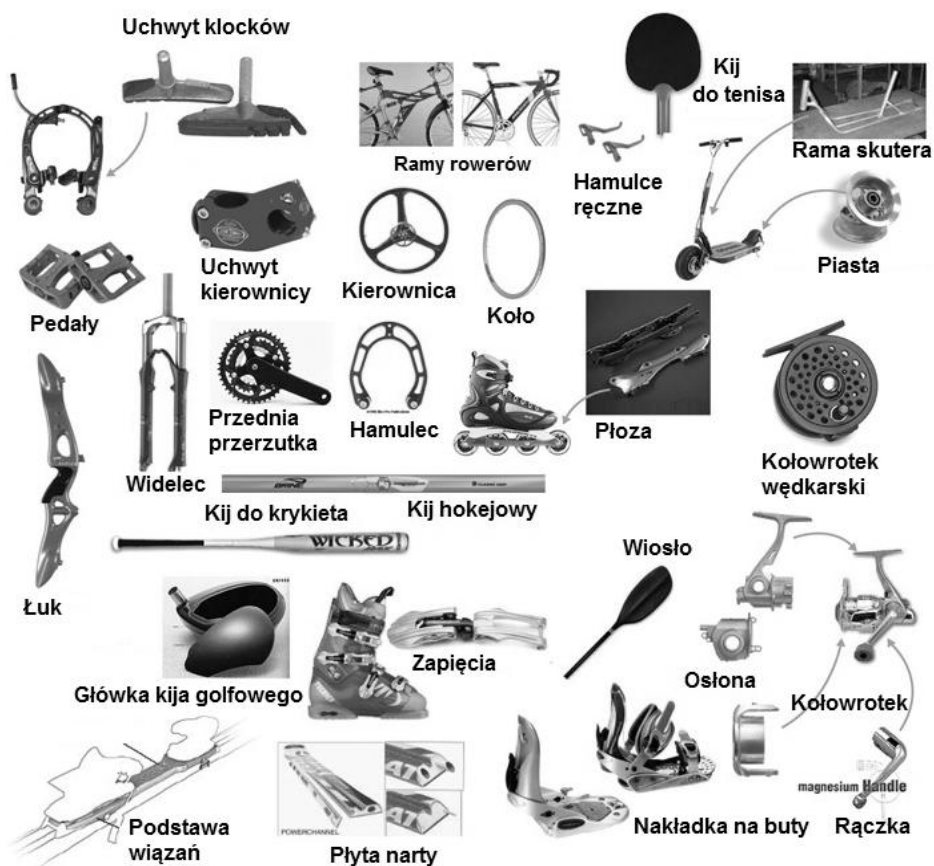


Rys. 2.32. Zastosowanie stopów magnezu w elektrotechnice: a) obudowa laptopa, b) obudowa komórki, c) elementy piaskarki, d) obudowa aparatu, e) obudowa kamery, f) elementy piły tarczowej [20, 65]

Ze względu na swoją małą masę właściwą i dobre własności wytrzymałościowe stopy magnezu są interesującym materiałem również dla producentów sprzętu sportowego i rekreacyjnego. Stopy magnezu stosowane są na elementy konstrukcyjne rowerów, sprzętu do wspinaczki wysokogórskiej, części konstrukcyjne rolek itp. (rys. 2.34) [93].



Rys. 2.33. Medyczne zastosowanie stopów magnezu [47, 104]



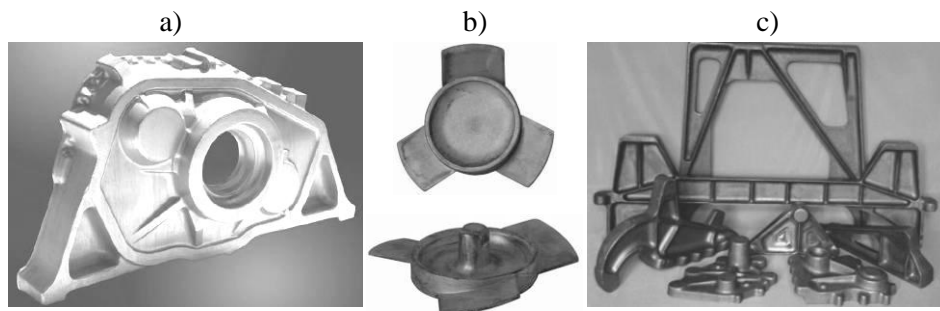
Rys. 2.34. Wykorzystanie stopów magnezu w sprzęcie sportowym i rekreacyjnym [105]

2.3.3 Kształtowanie plastyczne odkuwek ze stopów magnezu

Stopy magnezu podobnie jak inne metale lekkie są kształtowane w procesach obróbki plastycznej [5, 24, 83]. Odształcanie tych stopów odbywa się poprzez wyciskanie, walcowanie, tłoczenie, ciągnięcie, prasowanie i kucie [6, 7, 12, 33, 92, 107]. W tej części książki scharakteryzowano technologię kucia stopów magnezu, którą postanowiono wykorzystać do opracowania nowej metody kształtowania odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu.

Charakterystyka technologii kucia stopów magnezu

Kucie stopów magnezu jest zadaniem trudnym ze względu na specyficzne własności tych materiałów. Charakteryzują się one małą plastycznością, wąskim zakresem parametrów temperaturowych kształtowania oraz czułością na prędkość odształcania. Te przyczyny powodują, że żadna kuźnia w Polsce nie specjalizuje się w produkcji odkuwek ze stopów magnezu. Należy nadmienić, że trudności w opanowaniu tej technologii wynikają również z braku specjalistycznych urządzeń do spełnienia specyficznych warunków kształtowania tych stopów, ale również wymaganego doświadczenia personelu w plastycznym odształcaniu tego typu materiałów. Na świecie do kucia stopów magnezu stosuje się specjalistyczne prasy z drogimi systemami grzewczymi. Do zakładów, które wdrożyły technologię kucia tych materiałów na świecie należą firmy: Otto-Fuchs i Weisensee Warmpressteile z Niemiec oraz KUMZ z Rosji (rys. 2.35). Jednakże wymienieni producenci odkuwek magnezowych nie dostarczają ich na rynek polski.



Rys. 2.35. Odkuwki ze stopów magnezu wyprodukowane przez firmę: a) Otto-Fuchs (pokrywa obudowy przekładni z ZK30) [57], b) Weisensee Warmpressteile (wimik skrzydełkowy) [71], c) KUMZ (odkuwki dla przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego z AZ61A lub ZK60A)[56]

Jak podaje literatura specjalistyczna do kucia matrycowego stopów magnezu stosowane są prasy hydrauliczne lub mechaniczne o małych prędkościach roboczych, wyposażone w systemy grzewcze do podgrzewania narzędzi [4, 5, 68, 95].

Bardzo rzadko materiały te są kute na młotach, a do wyjątków należy stop AZ31B charakteryzujący się dużą plastycznością [83]. Do najczęściej odkuwanych na prasach gatunków stopów magnezu zalicza się: AZ31B, AZ61A, AZ80A i ZK60ZA [83]. Wymienione stopy z serii AZ są bardziej plastyczne przy mniejszej ilości dodatku aluminium i przeważnie mają szersze zastosowanie w przemyśle. Materiały na bazie magnezu z grupy ZK są zaś wykorzystywane do specjalistycznych rozwiązań ze względu na nieznacznie lepszą kujność od innych gatunków [83]. Niemniej jednak niektóre stopy odlewnicze np. AZ90 również mogą być z powodzeniem kształtowane poprzez kucie precyzyjne [99]. Dla większości stopów magnezu przeznaczonych do przeróbki plastycznej przedział temperatur kucia tych materiałów wynosi 290÷450°C [17]. Wąski zakres przeróbki plastycznej na gorąco wymaga stosowania wstępnego podgrzewania narzędzi do temperatury ok. 205÷350°C [17]. W tab. 2.3 zestawiono zalecane temperatury wsadu i narzędzi w procesie kucia wybranych stopów magnezu [17].

Tab. 2.3. Zalecany zakres temperatur przy kuciu stopów magnezu [17]

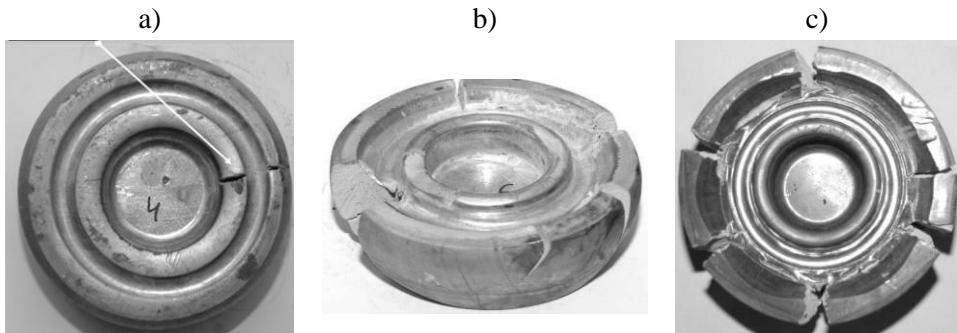
Oznaczenie stopu	Temperatura [°C]	
	Wsadu	Narzędzi
Stopy komercyjne		
ZK21A 300	300–370	260–315
AZ61A 315	315–370	290–345
AZ31B	290–345	260–315
Stopy o wysokiej wytrzymałości		
ZK60A	290–385	205–290
AZ80A	290–400	205–290
Stopy stosowane w podwyższonych temperaturach		
HM21A	400–525	370–425
EK31A	370–480	345–400
Stopy specjalne		
ZE42A	290–370	300–345
ZE62	300–345	300–345
QE22A	345–385	315–370

Utrzymanie założonej temperatury matrycy przy kształtowaniu stopów Mg wymaga użycia specjalnych systemów grzewczych umieszczanych w narzędziach. Przy kuciu tych stopów zaleca się realizację procesu w warunkach izotermicznych lub zbliżonych do nich [103]. Do głównych zalet zastosowania kucia izotermicznego w przypadku stopów magnezu można zaliczyć: podniesienie plastyczności tego materiału, zmniejszenie parametrów siłowych procesu, uzyskanie lepszej struktury w odkuwce poprzez obniżenie nierównomierności odkształceń.

W celu polepszenia warunków kształtowania na gorąco stopów magnezu w procesie kucia stosuje się smary w postaci: grafitu koloidalnego, dwusiarczku molibdenu, olei mineralnych, wosków, tłuszczów. Korzystne warunki tarcia zapewniają również nowe środki w postaci folii z tworzyw sztucznych [66].

Zjawiska ograniczające procesy kucia stopów magnezu

Do najczęściej występujących zjawisk ograniczających proces kucia stopów magnezu należą zakucia i pęknięcia. Przykłady pęknięć przedstawiono na rys. 2.36, na którym widnieją wadliwe odkuwki wykonywane na młocie matrycowym [34, 73].



Rys. 2.36. Pęknięcia materiału powstałe przy kuciu stopów: a) AZ61, b) AZ80, c) WE43 [34, 73]

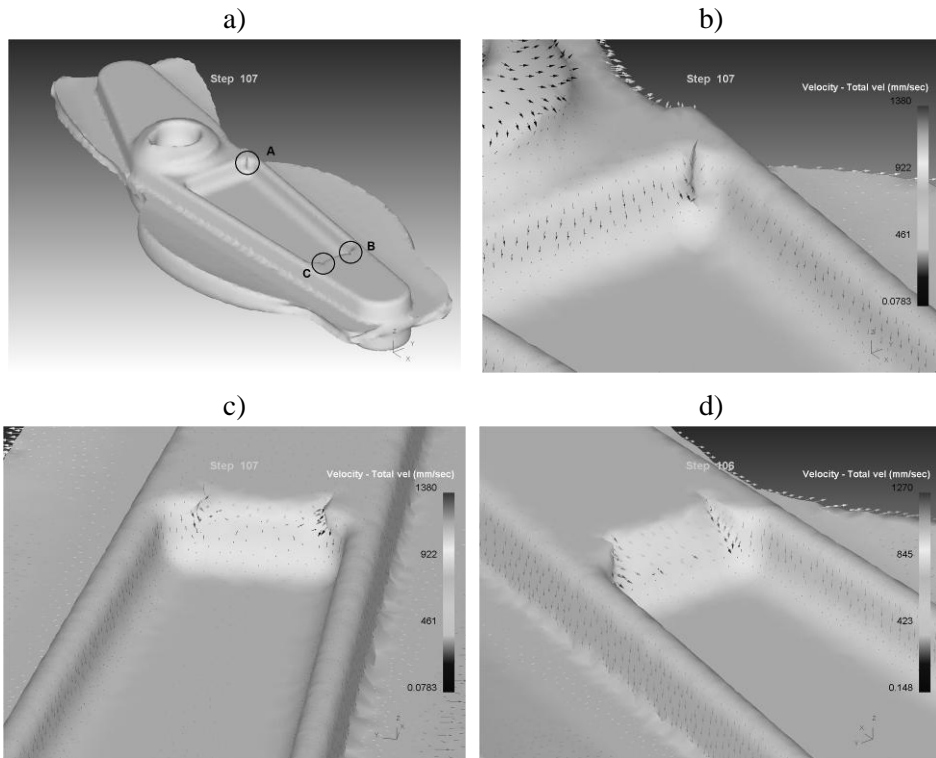
Przyczyną wystąpienia wad była zbyt duża prędkość odkształcenia oraz zbyt duże obniżenie temperatury wskutek wymiany ciepła pomiędzy materiałem kształtowanym i narzędziami oraz otoczeniem. W przypadku przedstawionych gatunków materiałów tj. AZ61, AZ80 i WE43 występuje znaczący spadek plastyczności w zastosowanych warunkach procesu. Należy zaznaczyć, że zastosowanie symulacji numerycznych z wykorzystaniem odpowiedniego modelu pęknięcia pozwala przewidzieć ryzyko wystąpienia pęknięć jeszcze podczas analizy teoretycznej procesu. Znając warunki graniczne takiego modelu można prognozować moment i miejsce wystąpienia pęknięć i przeciwdziałać temu zjawisku. Badania dotyczące zjawiska pęknięcia przeprowadzone dla stopu

magnezu AZ31 w zakresie temperatur 250, 350, 450°C z prędkościami rozciągania próbek $v=0,5; 5; 50$ mm/s pozwoliły określić graniczną całkę Cockrofta-Lathama dla tego materiału, która nie przekracza wartości 0,25, co w porównaniu z innymi materiałami jest wartością małą [38]. Prędkość odkształcenia ma istotny wpływ na plastyczność stopu Mg, przy czym im mniejsza prędkość odkształcenia tym wartość całki granicznej jest większa, co oznacza jego większą plastyczność. Analiza wpływu temperatury na wartość całki granicznej wykazała, że stop AZ31 charakteryzuje się najlepszą plastycznością w temperaturze $t=350^{\circ}\text{C}$, zaś bardzo małą plastycznością w temperaturze $t=250^{\circ}\text{C}$. Należy jednak zaznaczyć, że prognoza momentu powstania pęknięcia na podstawie symulacji jest zadaniem bardzo trudnym i często występują rozbieżności z rezultatami doświadczalnymi. Z tego powodu kryteria pęknięcia stosowane są często tylko do wyznaczenia obszarów odkuwki najbardziej narażonych na utratę spójności.

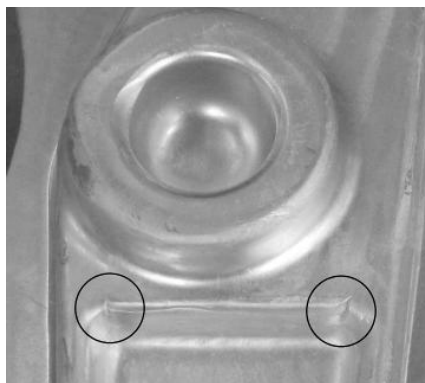
Kolejną wadą są zakucia, które powstają najczęściej w miejscach nagłej zmiany kierunku płynięcia materiału w szczególności w odkuwkach o złożonych kształtach. Jest to typowa wada występująca w procesach kucia wszystkich metali. Zastosowanie MES pozwala na dokładne prześledzenie kinematyki płynięcia materiału oraz zlokalizowanie ewentualnych miejsc wystąpienia zakuć na etapie projektowania procesu. Możliwość prognozowania zakuć przedstawiono na przykładzie odkuwki dźwigni ze stopu AZ31 [32]. Na podstawie wyników symulacji numerycznych procesu kucia tej odkuwki tworzenie się zakuć zaobserwowano w okolicach zaokrągleń wewnętrznej strony żebra (rys. 2.37). Przyczyną tworzenia się tej wady w operacji kucia wstępnego jest płynięcie materiału w dwóch przeciwnych kierunkach, co widoczne jest na rysunkach 2.37 b, d. Przeprowadzone próby przemysłowe kucia dźwigni potwierdzają wystąpienie zakuć w operacji kucia w wykroju wstępnie matrycuującym w zdiagnozowanym w symulacjach numerycznych obszarze (rys. 2.38) [33]. W celu otrzymania prawidłowej odkuwki niezbędne jest ich usunięcie przed operacją kucia końcowego lub zastosowanie odpowiedniego wykroju wstępnego.

Kolejnym przykładem prognozowania zakuć jest odkuwka piasty ze stopu AZ31. Podczas analizy procesu przeprowadzono weryfikację konieczności stosowania operacji spęczania przed kuciem wstępnym z niedokuciem [39]. Stwierdzono, że przy zbyt małym spęczeniu materiału uzyskano odkuwki posiadające zakucia w miejscu zgodnym z wynikami symulacji (rys. 2.39).

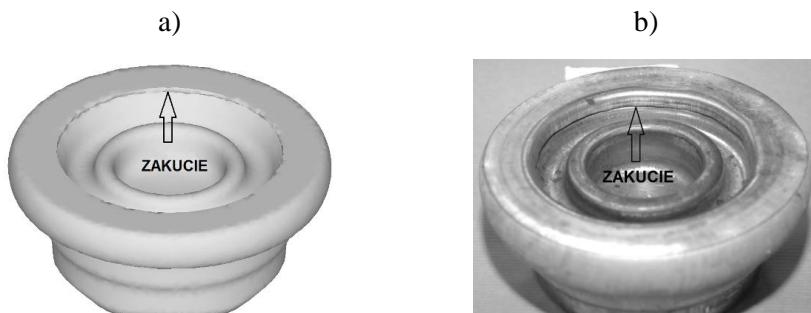
2. Analiza stanu zagadnienia



Rys. 2.37. Zakucia tworzące się w operacji kucia wstępnego z niedokuciem: a) widok całej odkucwki z zaznaczonymi miejscami, w których tworzą się zakucia, b) szczegół A, c) szczegół B (widok odwrócony), d) szczegół C (widok odwrócony) [32]



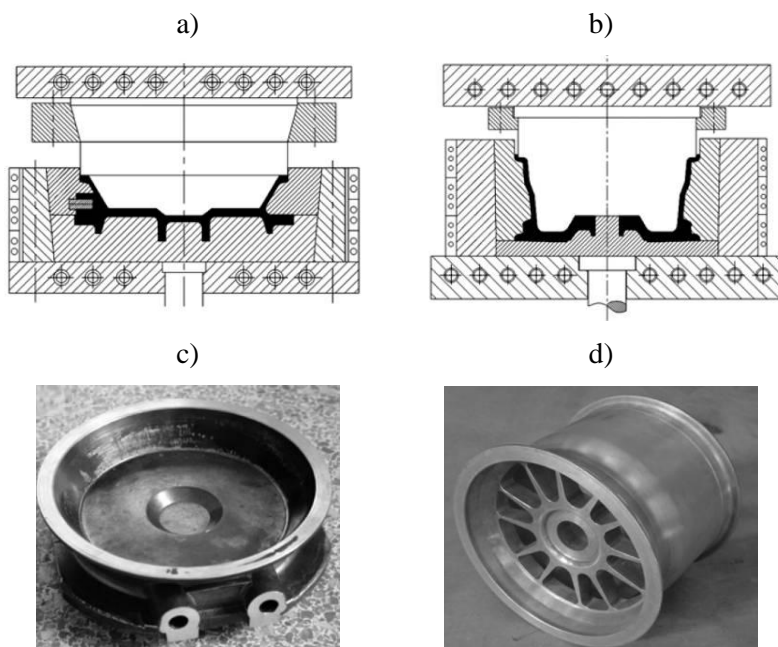
Rys. 2.38. Zakucia w odkucwce dzwigni uzyskanej w badaniach doświadczalnych [33]



Rys. 2.39. Zakucie powstałe w odkuwce wykonywanej bez operacji spęczania: a) wyniki symulacji, b) wyniki badań doświadczalnych [39]

Przykłady procesów technologicznych kucia stopów magnezu

Izotermiczne kucie odkuwki wspornika ze stopu odlewniczego AZ31 i felgi samochodowej ze stopu odlewniczego AZ80 na prasie hydraulicznej



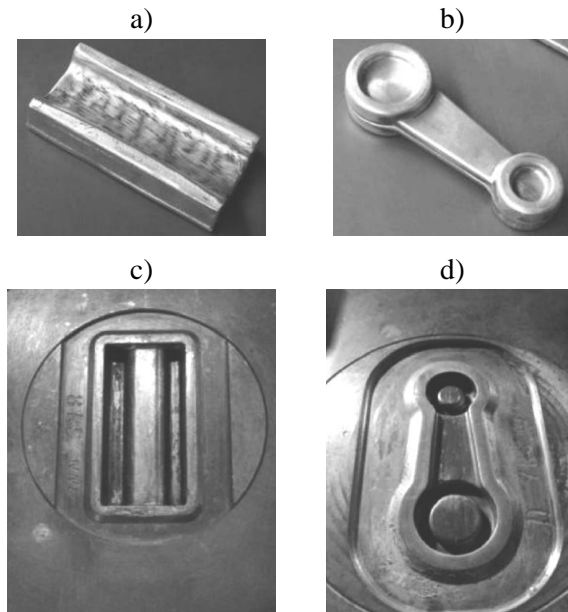
Rys. 2.40. Schemat przyrządów do kucia wspornika (a) i felgi (b) oraz przykłady ukształtowanej odkuwki wspornika (c) i felgi (d) [103]

W opracowaniu [103] przedstawiono technologię izotermicznego kucia wspornika ze stopu AZ31 i felgi samochodowej ze stopu AZ80 (rys. 2.40c i 2.40d). W procesie kształtowania stosowano temperaturę nagrzewania wsadu $360\pm 400^{\circ}\text{C}$. Proces realizowano na prasie hydraulicznej o nacisku 6,3 MN i prędkości ruchu suwaka 16 mm/s ze smarowaniem grafitem koloidalnym. Na rysunku 2.40a i 2.40b pokazano schemat narzędzi zastosowanych do kucia tego typu wyrobów [103]. Jak widać przyrządy zostały zaopatrzone w systemy grzewcze (zaznaczone okręgami na rysunkach), które pozwoliły na realizację procesu w warunkach izotermicznych.

Kucie odkuwki korbowodu ze stopu AZ80 na prasie hydraulicznej

W opublikowanej w 2002 roku pracy V. Kevorkijan i współautorzy przedstawili proces kucia odkuwki korbowodu ze stopu AZ80 [70]. Kształtowanie plastyczne odkuwki przeprowadzono na prasie hydraulicznej o nacisku 10 MN w temperaturze 300 i 400°C z prędkością odkształcenia $0,1\text{ s}^{-1}$ ze smarowaniem mieszkanką oleju z grafitem i tłuszczami zwierzęcymi. Odkute korbowody poddano obróbce cieplnej poprzez starzenie w temperaturze $177\pm 5^{\circ}\text{C}$ przez 24 godziny z chłodzeniem w powietrzu (T5).

Kucie na prasie hydraulicznej odkuwki korbowodu i odkuwki płaskiej ze stopu ZK60A

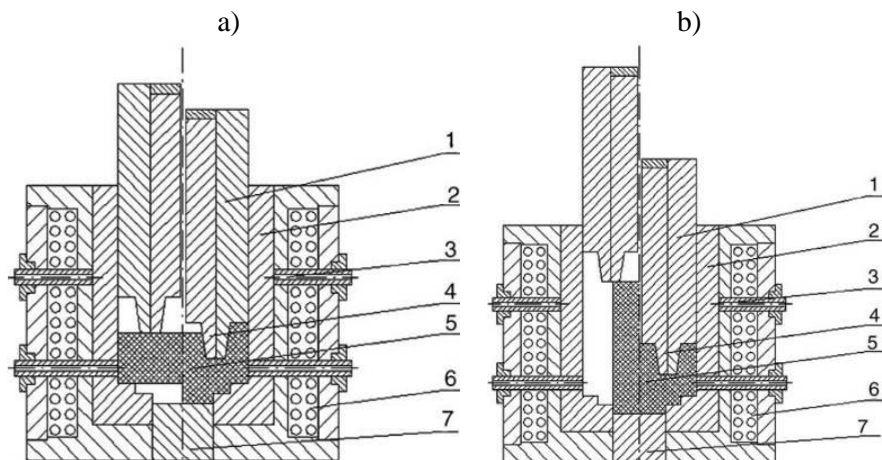


Rys. 2.41. Ukształtowana odkuwka płaska (a) i korbowodu (b) ze stopu ZK60A oraz matryce użyte do badań (c), (d) [89]

Badania kucia matrycowego stopu magnezu ZK60A prowadzono na prasie hydraulicznej pionowej o sile maksymalnej 2,5 MN dla przykładowych kształtów odkuwek (po usunięciu wypłytki) przedstawionych na rys. 2.41 a, b [89]. Jako materiał wyjściowy zastosowano pręty wyciskane o średnicy $\text{Ø}26$ mm i $\text{Ø}35$ mm. Proces kucia prowadzono dla wsadu nagrzanego do temperatury 350°C oraz 400°C . Zastosowano specjalnie skonstruowane matryce przedstawione na rys. 2.41 c, d, które podgrzewano do temperatury 250°C . W celu uniknięcia przylepiania się odkształcanego materiału do matryc zastosowano smarowanie grafitem.

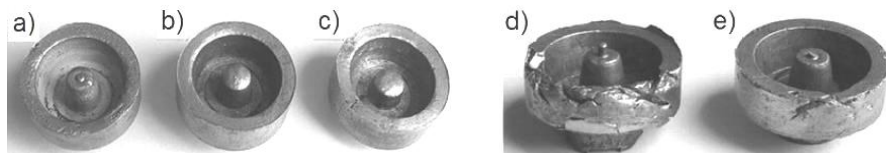
Kucie w matrycach zamkniętych stopu AZ31 w stanie lanim oraz stopu AZ61 w stanie wstępnie przerobionym plastycznie

Proces kucia prowadzono na prasie hydraulicznej o nacisku 1 MN z prędkością suwaka $v=1$ mm/s [99]. Kształtowaniu poddano stop AZ31 w stanie lanim oraz stop AZ61 w stanie wstępnie przerobionym plastycznie. Zastosowano dwa warianty smukłości wsadu: $h/d=0,8$ oraz $h/d=2,5$, wynikające z możliwości centrycznego ułożenia wsadu w matrycy. Schemat zestawów do kucia dla dwóch analizowanych przypadków pokazano na rys. 2.42. Proces realizowano ze smarowaniem przy użyciu dwusiarczku molibdenu. Przykładowe odkuwki uzyskane w badaniach przedstawiono na rys. 2.43 i 2.44.

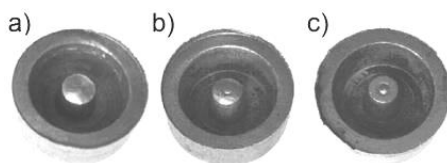


Rys. 2.42. Schemat zestawu do kucia dla: a) $h/d=0,8$ oraz b) $h/d=2,5$, gdzie 1 to stempel; 2 matryca; 3 termopary; 4 trzpień; 5 wsad; 6 układ grzewczy; 7 wypychacz [99]

2. Analiza stanu zagadnienia



Rys. 2.43. Odkuwki uzyskane w próbach kucia w matrycach zamkniętych ze stopu AZ31 w stanie lanym dla wsadu: $h/d=0,8$ odkształcanego w temperaturach a) 300°C, b) 230°C, c) 200°C; $h/d=2,5$ odkształcanego w temperaturach d) 200°C, e) 280°C [99]



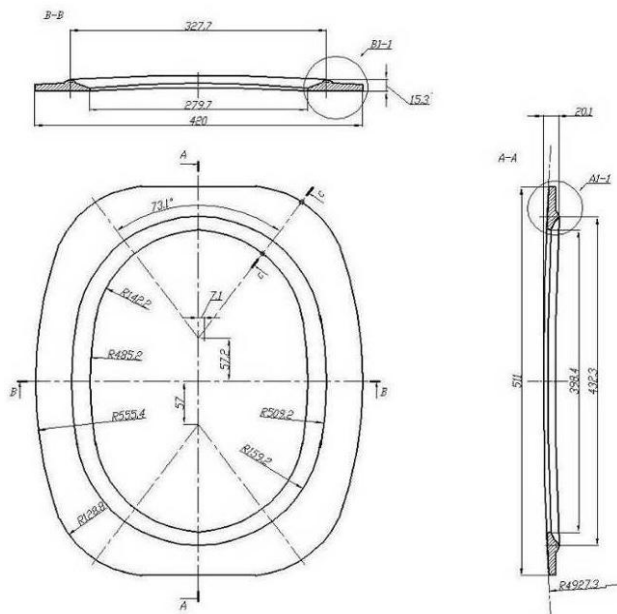
Rys. 2.44. Odkuwki ze stopu AZ61 w stanie wstępnie przerobionym plastycznie uzyskane w próbach kucia w matrycach zamkniętych dla wsadu $h/d=0,8$ odkształcanego w temperaturach: a) 150°C, b) 200°C, c) 350°C [99]

Kucie na prasie odkuwki ramy okiennej samolotu ze stopu AZ80 w stanie odlanym i stopu AZ31 w stanie po walcowaniu

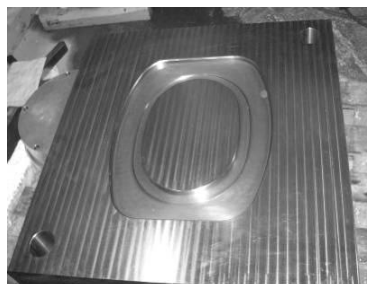
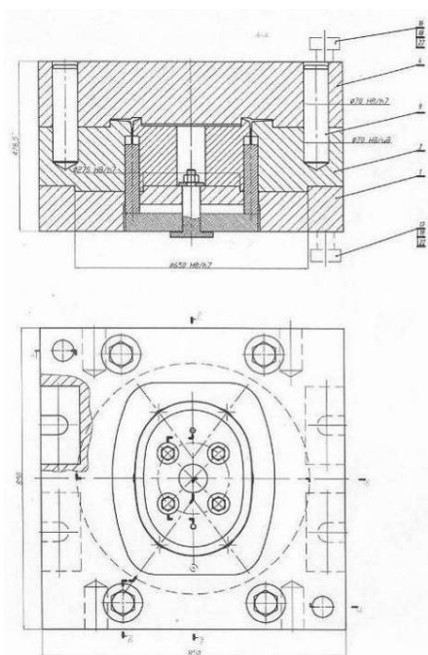
W opublikowanym w 2010 roku raporcie projektu MAGFORMING – „Development of New Magnesium Forming Technologies for the Aeronautics Industry” koordynowanym przez firmę PALBAM Metal Works przedstawiono proces kucia odkuwki ramy okiennej samolotu Airbus ze stopów odlewanych AZ80 i przerobionych plastycznie AZ31 (rys. 2.45 i 2.46) [45]. Kształtowanie plastyczne odkuwki przeprowadzono w matrycach zamkniętych na prasie hydraulicznej o nacisku 50 MN w temperaturze 320÷330°C. Zestaw narzędzi użyty do badań przedstawiono na rys. 2.47.



Rys. 2.45. Kształt odkuwki ramy okiennej samolotu Airbus ze stopu magnezu [45]



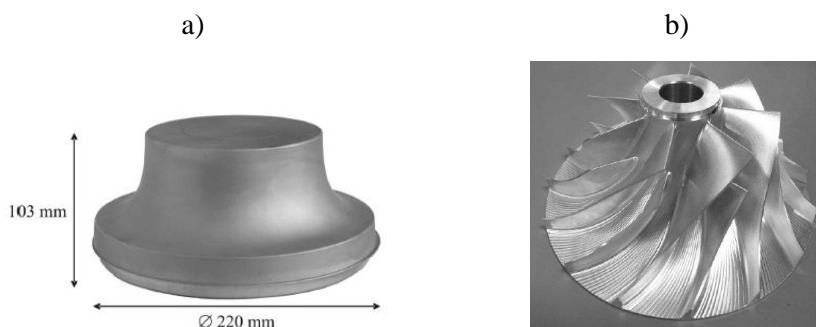
Rys. 2.46. Rysunek techniczny ramy okiennej samolotu [45]



Rys. 2.47. Schemat oprzyrządowania do kucia odkuwki ramy okiennej samolotu [45]

Kucie izotermiczne półfabrykatu wirnika sprężarkowego ze stopu AZ80 i WE43 na prasie hydraulicznej

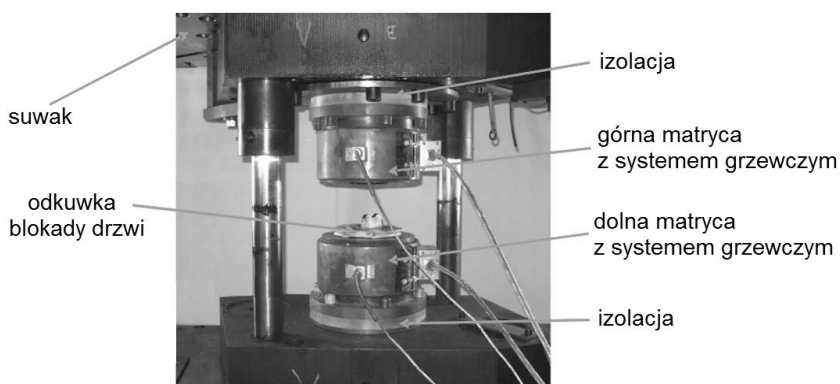
W opracowaniu [45] przedstawiono proces technologiczny kucia półfabrykatu do wykonania wirnika sprężarkowego ze stopu AZ80 i WE43 przedstawionego na rys. 2.48. Kucie przeprowadzono dla wsadu o wymiarach $\varnothing 134 \times 173$ mm i narzędzi nagranych do temperatury 350°C przemieszczających się z prędkością $v=10$ mm/s.



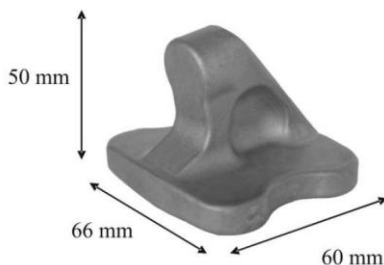
Rys. 2.48. Odkuty półfabrykat wirnika sprężarkowego (a) oraz gotowa część po obróbce mechanicznej (b) [45]

Izotermiczne kucie odkuwki blokady drzwi samolotu ze stopu AZ80 i WE43 na prasie hydraulicznej

Proces kucia izotermicznego odkuwki blokady drzwi samolotu ze stopu AZ80 i WE43 wykonano dla wsadu o wymiarach $\varnothing 65 \times 60$ mm w temperaturze 300°C z prędkością 10 mm/s [45]. Zastosowano specjalnie skonstruowane matryce z systemem nagrzewania przedstawione na rys. 2.49. Zdjęcia ukształtowanego wyrobu przedstawiono na rys. 2.50.



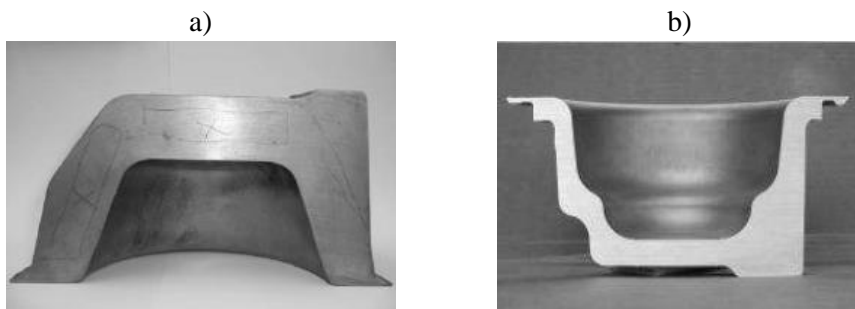
Rys. 2.49. Narzędzia użyte do kucia odkuwki blokady drzwi samolotu [45]



Rys. 2.50. Odkuwka blokady drzwi samolotu ze stopu magnezu [45]

Kucie odkuwki obudowy sprężarki dla systemu klimatyzacyjnego ze stopu WE43

Proces kucia odkuwki obudowy sprężarki ze stopu magnezu WE43 prowadzono w dwóch operacjach (rys. 2.51) [46]. Ostateczny kształt wyrobu po kuciu przedstawiono na rys. 2.52. Masa uzyskanej odkuwki ze stopu magnezu wynosiła 1,06 kg, zaś ze stopu aluminium wynosiłaby 1,6 kg.



Rys. 2.51. Kształt odkuwki obudowy sprężarki ze stopu WE43 pokazany w przekroju poprzecznym po: a) pierwszej operacji kucia – zarejestrowana siła 5500 kN, b) drugiej operacji kucia – zarejestrowana siła 10500 kN [46]



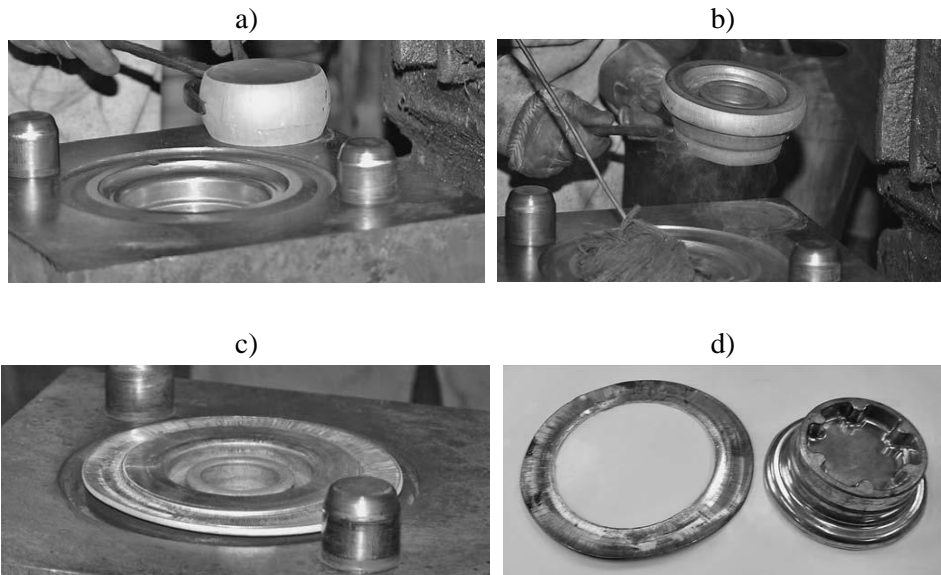
Rys. 2.52. Odkuwka obudowy sprężarki dla systemu klimatyzacyjnego ze stopu magnezu WE43 [46]

Kucie na młocie odkuwki piasty lotniczej ze stopu AZ31

Technologię kucia odkuwki piasty samolotowej ze stopu AZ31 prowadzono na młocie o energii uderzenia 63 kJ i masie części spadającej wynoszącej 2100 kg [41]. Proces kształtowania analizowanej odkuwki został przeprowadzony według następujących operacji:

- cięcie pręta ze stopu AZ31 na wymiar $\text{Ø}100 \times 93$ mm,
- nagrzanie materiału wsadowego do temperatury 410°C ,
- spęczanie (1 uderzenie) (rys. 2.53 a) i kucie wstępne z niedokuciem (3 uderzenia) (rys. 2.53 b),
- zaczyszczenie wad,
- nagrzanie przedkuwki do temperatury 410°C ,
- kucie w wykroju matrycującym (3 uderzenia) (rys. 2.53 c),
- okrawanie wpływki (rys. 2.53 d).

Podczas kucia matryce smarowano łożem z grafitem.



Rys. 2.53. Poszczególne etapy kształtowania odkuwki piasty ze stopu AZ31 na młocie:

- a) spęczanie, b) kucie wstępne z niedokuciem, c) kucie w wykroju matrycującym, d) okrawanie wpływki [39]

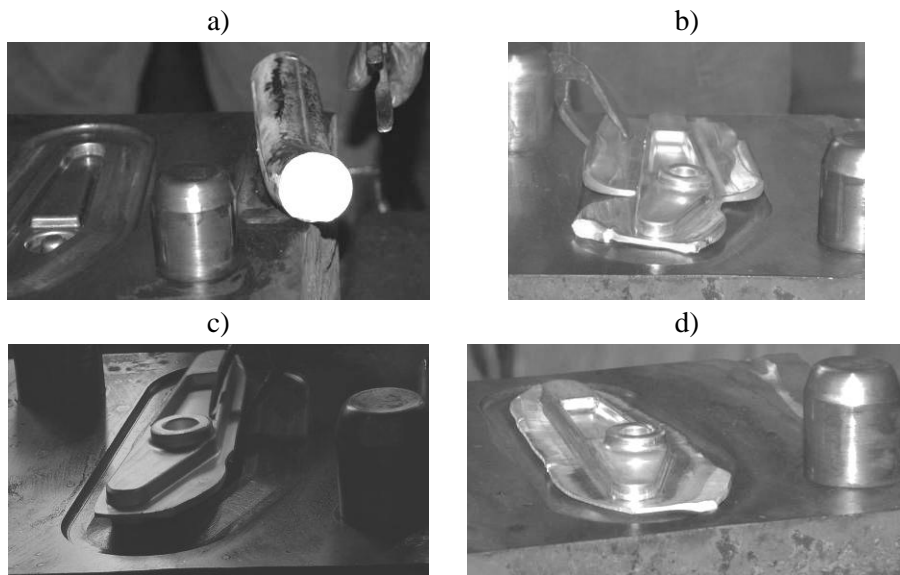
Kucie na młocie odkuwki dźwigni lotniczej ze stopu AZ31

Innym przykładem kucia stopu AZ31 na młocie jest proces kształtowania odkuwki dźwigni lotniczej przedstawionej na rys. 2.54 [33].



Rys. 2.54. Odkuwka dźwigni lotniczej ze stopu AZ31 [33]

Materiałem wyjściowym był pręt o średnicy $\text{Ø}40 \times 210$ mm, który nagrzewano do temperatury 410°C . Następnie przeprowadzono gięcie wsadu na młocie o energii uderzenia 63 kJ i masie części spadającej wynoszącej 2100 kg. W dalszym etapie przełożono go do wykroju matrycującego obracając o 90° i kuto z 3 mm niedokuciem na tym samym młocie. Ochłodzone na powietrzu przedkuwki poddano okrawaniu wypływki. Następnie je podgrzano do temperatury 410°C i kuto w wykroju matrycującym. Ukształtowane odkuwki poddano okrawaniu wypływki. Poszczególne etapy kształtowania odkuwki dźwigni na młocie przedstawiono na rys. 2.55.



Rys. 2.55. Etapy kształtowania odkuwki dźwigni ze stopu AZ31 na młocie: a) gięcie, b) kucie wstępne z niedokuciem, c) kucie w wykroju matrycującym, d) okrawanie wypływki [33]

2.4 Wnioski z analizy stanu zagadnienia

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury w zakresie wytwarzania wyrobów uźebrowanych ze stopów magnezu sformułowano następujące wnioski:

- stwierdzono brak efektywnych metod kształtowania plastycznego odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu, w szczególności z wysokimi i cienkimi żebrami;
- tradycyjne procesy kucia stopów magnezu realizuje się w warunkach izotermicznych lub do nich zbliżonych z małymi prędkościami roboczymi na prasach wyposażonych w drogie systemy nagrzewania narzędzi.

Dodatkowo biorąc pod uwagę ograniczenia obecnie stosowanych metod wytwarzania części z żebrami tj. nienajlepszych własności wytrzymałościowych i użytkowych wyrobów odlewanych oraz małej wydajności i dużej materiałochłonności procesów obróbki skrawaniem za uzasadnione uznano opracowanie efektywnej technologii kształtowania plastycznego wyrobów uźebrowanych z wykorzystaniem możliwości trójsuwakowej prasy kuźniczej.

3. BADANIA WŁASNOŚCI WYBRANYCH STOPÓW MAGNEZU W WARUNKACH KSZTAŁTOWANIA NA GORĄCO

3.1 Badania plastometryczne – budowa modelu materiałowego

Nowoczesne projektowanie technologii związane jest z symulacjami numerycznymi, w których istotnym czynnikiem warunkującym dokładność obliczeń jest model materiałowy. Głównym jego elementem jest zależność pomiędzy naprężeniami i odkształceniami przy różnych warunkach kształtowania, zwanych krzywymi umocnienia lub krzywymi płynięcia. W związku z prowadzonymi pracami badawczymi nad technologią kształtowania stopów magnezu uznano za celowe wyznaczenie takich zależności. W niniejszym podrozdziale przedstawiono krzywe płynięcia opracowane na podstawie badań własnych plastometrycznych oraz w oparciu o literaturę specjalistyczną. Na ich podstawie zostały opracowane modele materiałowe wybranych gatunków stopów magnezu do dalszych badań. Modele te wykorzystano do symulacji procesów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu w oprogramowaniu bazującym na MES wspomagającym projektowanie technologii obróbki plastycznej.

3.1.1 Metodyka badawcza

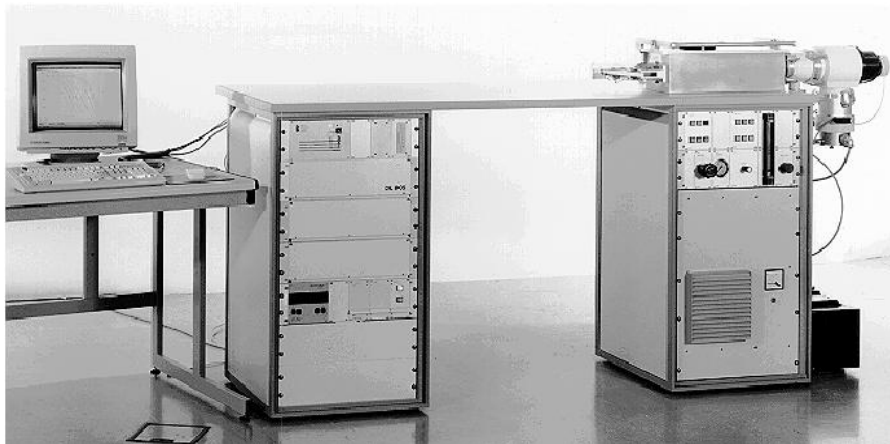
Badania plastometryczne przeprowadzono w oparciu o próbę ściskania dla stopu magnezu MgAl4Zn (oznaczenie MA2 według GOST) zawierającego w swym składzie od 94,4÷97,65% magnezu (tab. 3.1).

Tab. 3.1. Skład chemiczny stopu magnezu MgAl4Zn (oznaczenie MA2 według GOST) (% mas.)

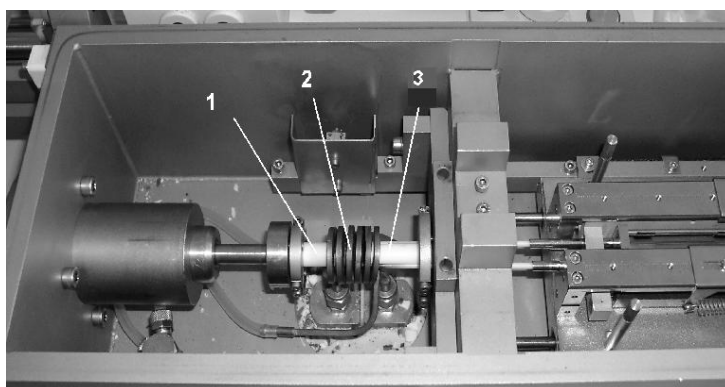
Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Be	Zn	Mg	Inne
do 0,05	do 0,1	0,15÷0,5	do 0,005	3÷4	do 0,05	do 0,02	0,2÷0,8	94,4÷97,65	0,3

Próby wykonano na dylatometrze DIL 805 A/D (rys. 3.1 i 3.2) wyposażonym w przystawkę plastometryczną oraz program WinTa 6.2 rejestrujący zmiany długości w czasie, temperaturę oraz siłę ściskającą i na ich podstawie przeliczający m.in. intensywność odkształcenia i naprężenia uplastyczniające. Do badań zastosowano próbki walcowe o wymiarach $\varnothing 5 \times 10$ mm. W celu określenia wpływu prędkości odkształcenia na wartość naprężeń uplastyczniających przy uwzględnieniu możliwości technicznych stosowanego urządzenia badawczego zaplanowano trzy prędkości odkształcenia: $\dot{\epsilon}_1 = 0,1 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_2 = 1 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_3 = 10 \text{ s}^{-1}$. Badania przeprowadzono w temperaturze: $t_1 = 250^\circ\text{C}$, $t_2 = 350^\circ\text{C}$, $t_3 = 450^\circ\text{C}$. Przy każdym parametrach

stosowano trzykrotny pomiar, a wyniki uśredniano. W czasie badań w temperaturze 350°C i prędkości odkształcenia 10 s⁻¹ wystąpiły problemy techniczne i w związku z tym danych dla tego zakresu parametrów nie uwzględniono w dalszej analizie. Na podstawie uzyskanych wyników z pomiarów wyznaczono krzywe płynięcia stopu MgAl4Zn.



Rys. 3.1. Dylatometr DIL805A/D



Rys. 3.2. Komora do badań plastometrycznych dylatometru DIL805 A/D:
1 – kowadło ruchome, 2 – cewka indukcyjna, 3 – kowadło nieruchome

Krzywe płynięcia stopu magnezu AZ31 wytypowanego do badań opracowano na podstawie danych doświadczalnych wyznaczonych w próbach plastometrycznych przedstawionych w literaturze specjalistycznej [1, 76, 98]. Skład chemiczny stopu AZ31 zawierającego 93,5÷96,1% Mg pokazano w tab. 3.2.

Tab. 3.2. Skład chemiczny stopu magnezu AZ31 (% mas.)

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Si	Fe	Ca	Mg	Inne
2,5÷ 3,5	0,2÷ 1	0,6÷ 1,4	0,1	0,05	0,005	0,1	0,005	0,04	93,5÷ 96,1	0,3

Krzywe płynięcia wyznaczone zostały metodą ściskania z prędkościami odkształcenia: $\dot{\varepsilon}_1=0,001 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_2=0,01 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_3=0,1 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_4=1 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\varepsilon}_5=5 \text{ s}^{-1}$. Badania te przeprowadzono w temperaturach: $t_1=20^\circ\text{C}$, $t_2=50^\circ\text{C}$, $t_3=100^\circ\text{C}$, $t_4=150^\circ\text{C}$, $t_5=200^\circ\text{C}$, $t_6=300^\circ\text{C}$, $t_7=400^\circ\text{C}$, $t_8=500^\circ\text{C}$. W celu ujednoczenia oznaczeń nie zamieszczono oryginalnych rysunków z prac tylko sporządzono nowe wykresy przedstawiające krzywe płynięcia stopu AZ31.

3.2 Wyniki badań i ich analiza

Przebiegi naprężeń uplastyczniających stopu MgAl4Zn w funkcji odkształcenia dla stosowanych prędkości odkształcenia i temperatur przedstawiono na rys. 3.3÷3.5. Uzyskane wyniki badań opisano funkcjami uzależniającymi wartość naprężeń uplastyczniających od parametrów odkształcenia. W opisywanym przypadku wybrano dwie funkcje w postaci równań [25, 44]:

$$\sigma_p = A \cdot \varepsilon^B \cdot \exp(C \cdot \varepsilon) \cdot \dot{\varepsilon}^D \cdot \exp(E \cdot t) \quad (3.1)$$

oraz

$$\sigma_p = A \cdot \varepsilon^{B+CT} \exp(D \cdot \varepsilon) \cdot \dot{\varepsilon}^{E+FT} \cdot \exp(G \cdot T) \quad (3.2)$$

gdzie:

σ_p – naprężenia uplastyczniające, MPa,

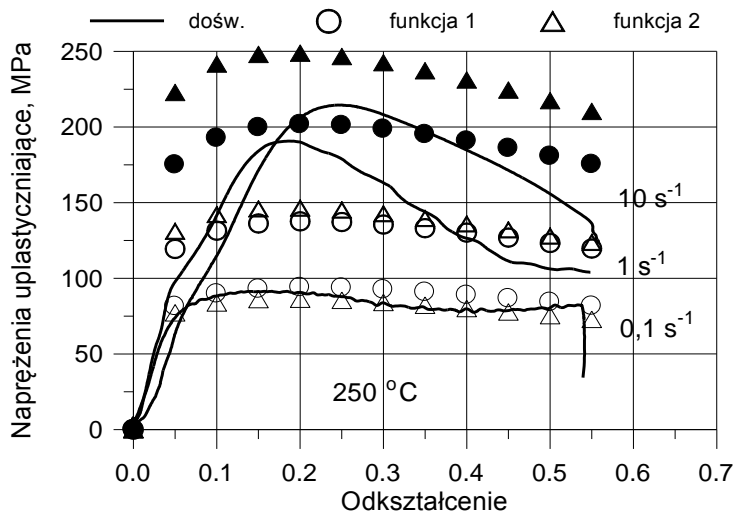
ε – odkształcenie zastępcze,

$\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia, s^{-1} ,

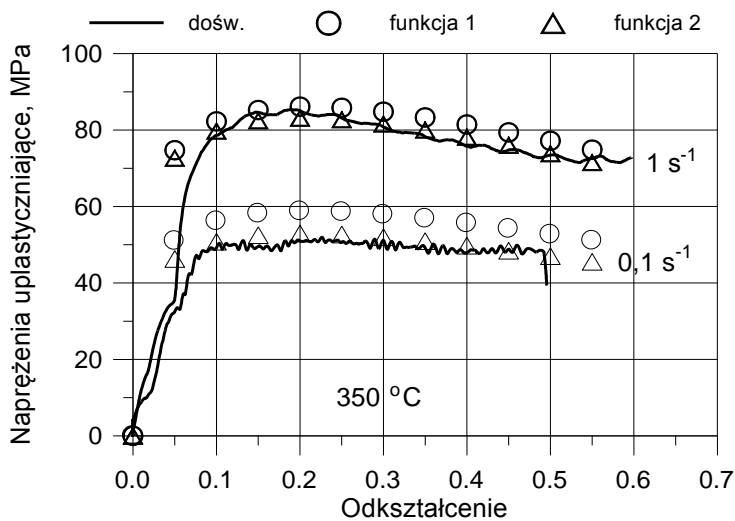
t – temperatura badania, $^\circ\text{C}$,

T – temperatura badania, K,

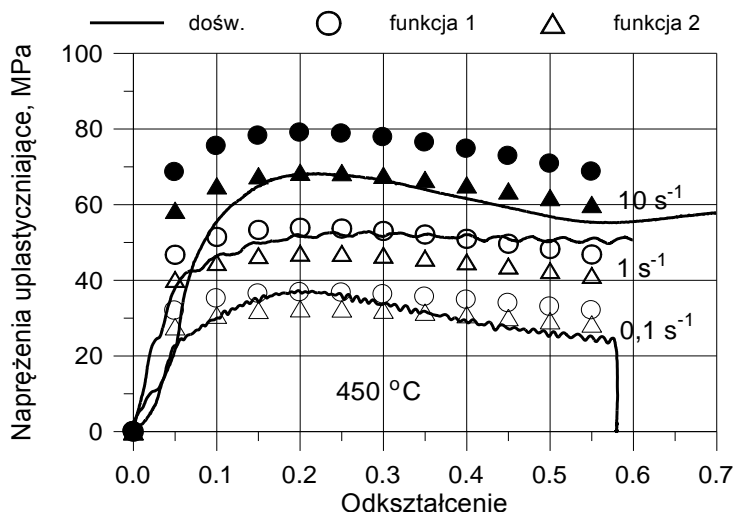
A, B, C, D, E, F, G – stałe współczynniki.



Rys. 3.3. Porównanie krzywych doświadczalnych z krzywymi teoretycznymi stopu MgAl4Zn wyznaczonymi na podstawie funkcji (3.1) i (3.2) dla temperatury 250°C



Rys. 3.4. Porównanie krzywych doświadczalnych z krzywymi teoretycznymi stopu MgAl4Zn wyznaczonymi na podstawie funkcji (3.1) i (3.2) dla temperatury 350°C



Rys. 3.5. Porównanie krzywych doświadczalnych z krzywymi teoretycznymi stopu MgAl4Zn wyznaczonymi na podstawie funkcji (3.1) i (3.2) dla temperatury 450°C

Funkcje (3.1) i (3.2) uwzględniają wpływ mierzonych w czasie badań parametrów: odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury, na wartość naprężeń uplastyczniających. Do wyznaczania współczynników funkcji $A \div G$ zastosowano metodę optymalizacji Generalized Reduced Gradient (GRG2) zaimplementowaną w programie Microsoft Excel. Funkcja celu zdefiniowana została równaniem:

$$\Phi_{\sigma} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(\sigma_{pt} - \sigma_{pex})^2}{\sigma_{pex}^2} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

gdzie:

σ_{pt} – wartość naprężeń uplastyczniających obliczonych w oparciu o funkcje (3.1) i (4.2),

σ_{pex} – doświadczalna wartość naprężeń uplastyczniających,

k – liczba punktów pomiarowych.

Należy zaznaczyć, że krzywe uzyskane dla temperatury 250°C i prędkości 1 s^{-1} i 10 s^{-1} wykazują inny charakter przebiegu od pozostałych krzywych (rys. 3.3). Po początkowym dużym wzroście wartości naprężeń i osiągnięciu maksimum następuje gwałtowny spadek naprężeń wraz ze zwiększeniem odkształcenia. W celu zmniejszenia błędów obliczeń nie uwzględniono ich przy wyznaczaniu współczynników funkcji. Na podstawie wstępnych obliczeń stwierdzono, że na dokładność wyników znacząco wpływa duża liczba punktów pomiarowych dla zakresu małych wartości odkształceń, które z punktu widzenia procesów obróbki

plastycznej mają ograniczone znaczenie. Uwzględnienie danych dla tego zakresu generuje błędy; powoduje zwiększenie różnicy pomiędzy wartościami zmierzonymi i teoretycznymi wraz ze wzrostem odkształceń. Sprawdzono, że zdecydowanie lepsze dopasowanie (mniejsza wartość funkcji celu) występuje w przypadku wyznaczenia funkcji dla odkształceń większych od 0,1. Z tego powodu w dalszych obliczeniach zakres małych odkształceń został pominięty. Z drugiej strony, przyjęcie takiego założenia spowodowało, że wyznaczone funkcje miały charakter hiperboli tzn. w zakresie odkształceń bliskich zera wartości naprężeń dążyły do nieskończoności. Stwarza to komplikacje w zaimplementowaniu takich funkcji w programach obliczeniowych. Aby uniknąć tych niedogodności stosowano ograniczenia wartości dla odpowiednich współczynników. Przykładowo, dla funkcji (3.1) założono, że współczynnik $B > 0$. Uwzględniając powyższe uwagi wykonano obliczenia optymalizacyjne, których wyniki przedstawiono w tab. 3.3 oraz na rys. 3.3÷3.5. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że zastosowanie funkcji (3.2) powoduje lepszą zgodność z wynikami doświadczalnymi niż zastosowanie funkcji (3.1). Stąd też przyjęto, że funkcja (3.2) wykorzystana zostanie do opisu modelu materiałowego przy analizach procesów kształtowania plastycznego stopu MgAl4Zn.

Tab. 3.3. Wyznaczone wartości współczynników funkcji (4.1) i (4.2) dla stopu MgAl4Zn

Nr funkcji	Współczynniki							Funkcja celu Φ_{σ} , %
	A	B	C	D	E	F	G	
(4.1)	765,8	0,212	-1,013	0,166	-0,00496	-	-	0,674
(4.2)	4087,2	0,100	0,000175	-1,034	0,408	-0,00034	-0,00538	0,631

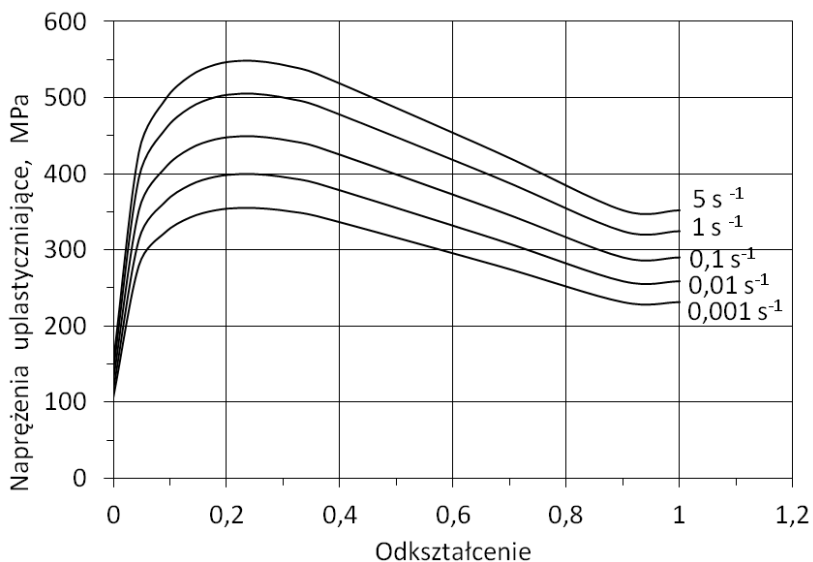
Stop MgAl4Zn wykazuje dużą czułość na prędkość odkształcenia w całym zakresie temperatur stosowanych w badaniach plastometrycznych. Najwyraźniej jest to widoczne w temperaturze 250°C, w której przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ naprężenia uplastyczniające przekraczają wartość 200 MPa, natomiast przy prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$ są one ponad dwukrotnie mniejsze. Procesy kształtowania badanego stopu korzystniej jest więc realizować przy zastosowaniu maszyn kuzniczych o małych prędkościach ruchu narzędzi. Wyniki badań plastometrycznych wykazały, że w temperaturze 250°C stop MgAl4Zn ulega stosunkowo dużemu umocnieniu odkształceniowemu, w szczególności przy dużych prędkościach odkształcenia. Wyniki te są zgodne z podawanymi w literaturze specjalistycznej zakresami temperatur kucia, zawierającymi się w przedziale 300°C÷430°C. Jest to niekorzystne z technologicznego punktu widzenia, ze względu na trudność utrzymania temperatury odkształcanego materiału

w tak wąskim zakresie. Należy zatem przypuszczać, że odpowiednim procesem kształtowania badanego stopu może być kucie izotermiczne.

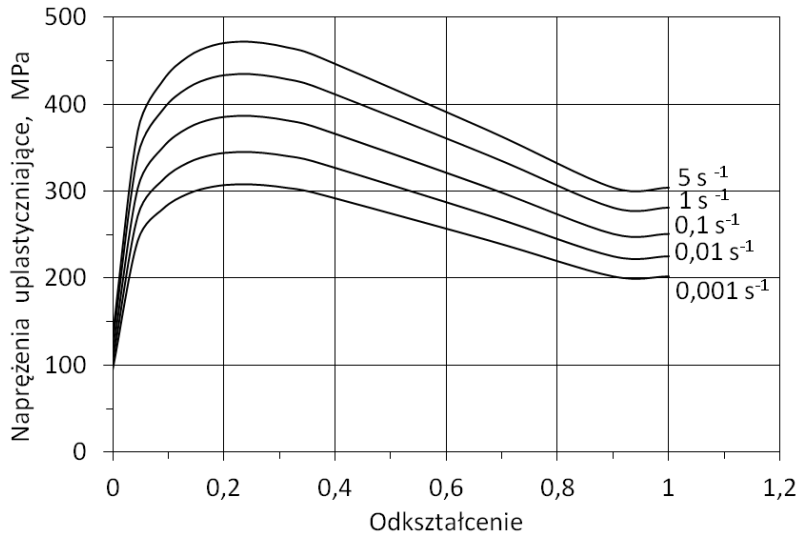
Wykresy krzywych płynięcia stopu AZ31 opracowane na podstawie badań innych autorów [1, 76, 98] przedstawiono na rys. 3.6÷3.13. Ze względu na różnice wyników badań plastometrycznych podawanych przez różnych autorów postanowiono opisać je za pomocą funkcji (3.4) uzależniającej wartość naprężeń uplastyczniających od parametrów odkształcenia. W opisywanym przypadku wyznaczono następującą funkcję:

$$\sigma_p = 26 + 1156 \cdot (\varphi + 0,001)^{0,317} \cdot \exp(-1,349 \cdot \varphi^{0,054} \cdot \exp(-0,0053 \cdot T)) \quad (3.4.)$$

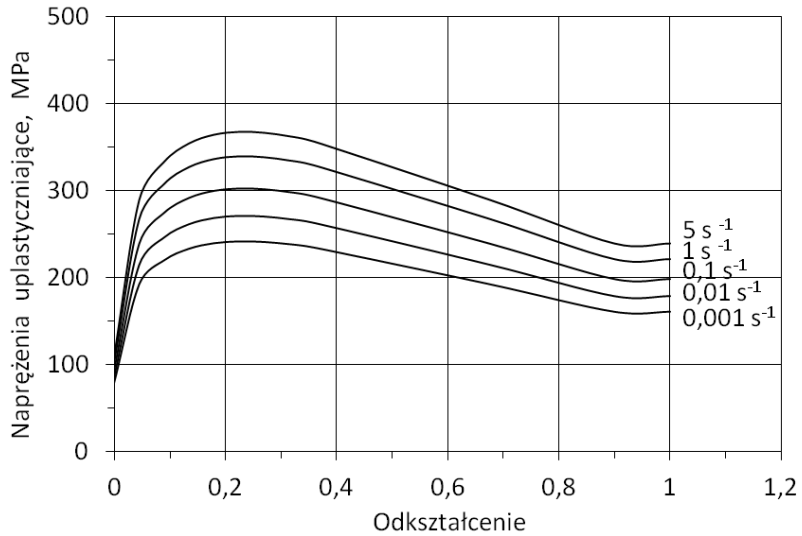
Na podstawie tej funkcji opracowano model materiału do obliczeń numerycznych w zakresie temperatury 20÷500°C, prędkości odkształcenia 0,001÷5 s⁻¹ oraz wartości odkształcenia 0÷1.



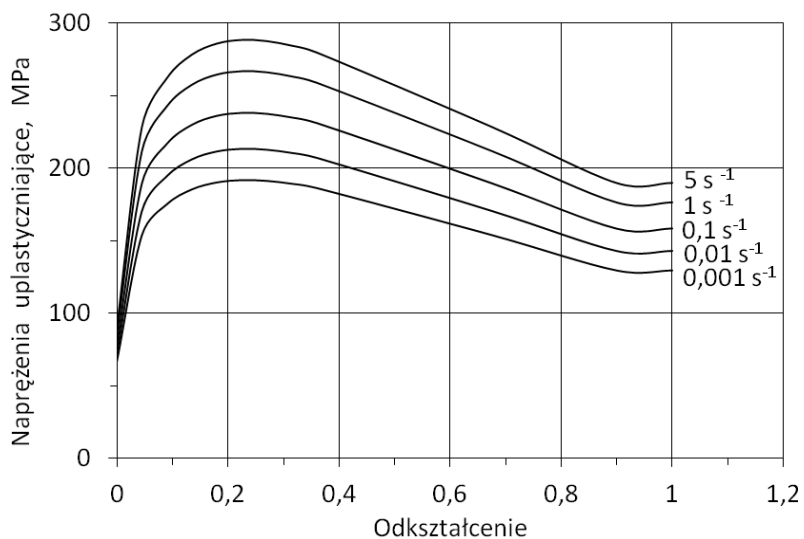
Rys. 3.6. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 20°C [1, 76, 98]



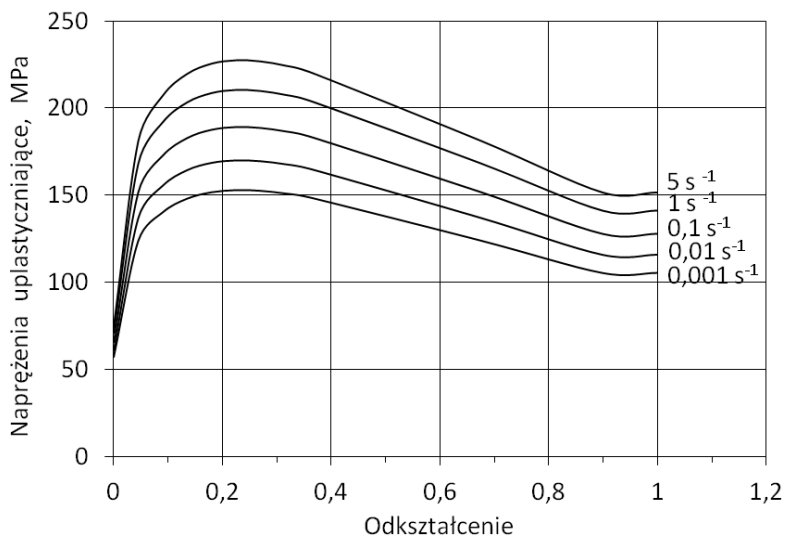
Rys. 3.7. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 50°C [1, 76, 98]



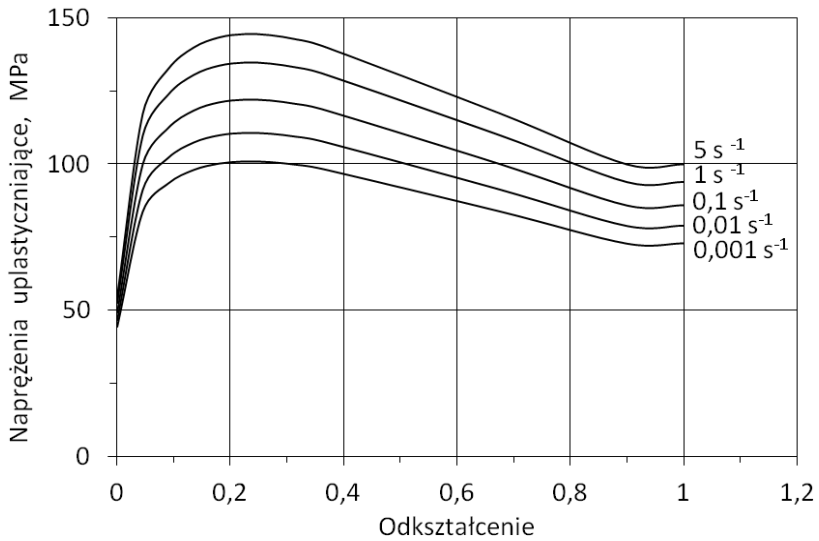
Rys. 3.8. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 100°C [1, 76, 98]



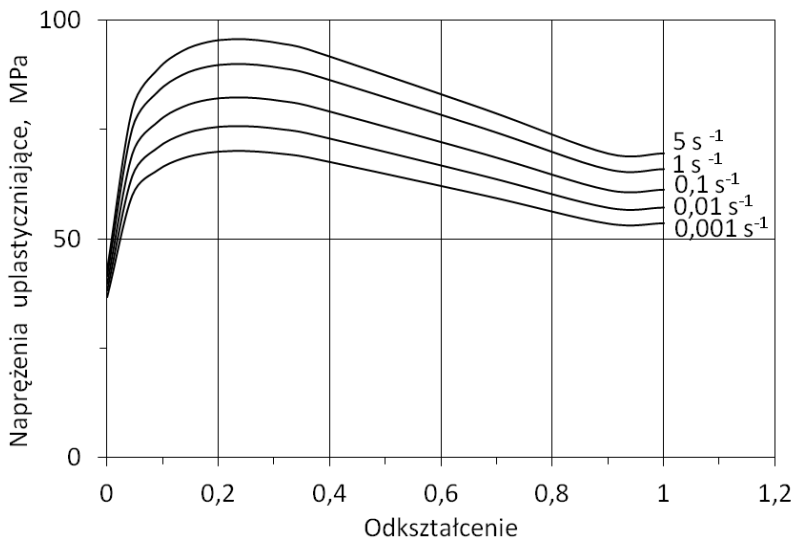
Rys. 3.9. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 150°C [1, 76, 98]



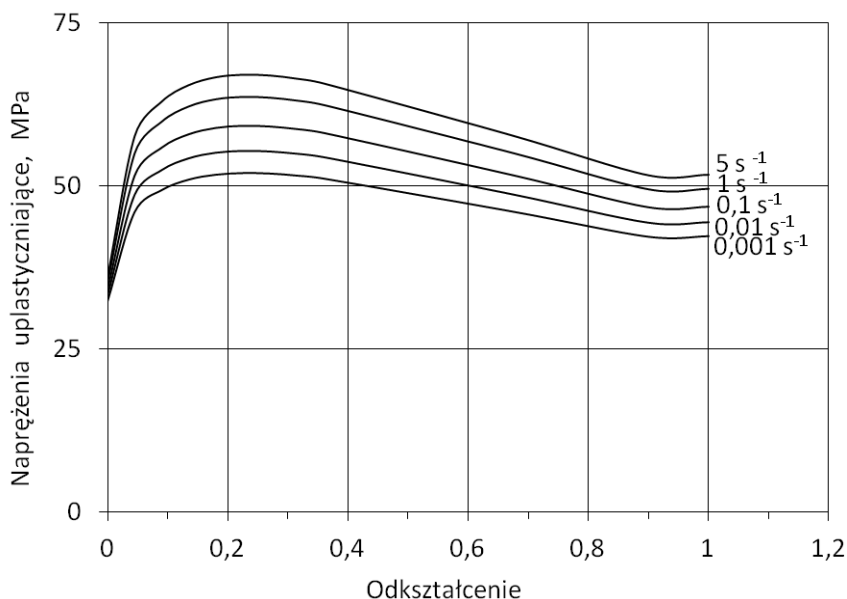
Rys. 3.10. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 200°C [1, 76, 98]



Rys. 3.11. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 300°C [1, 76, 98]



Rys. 3.12. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 400°C [1, 76, 98]



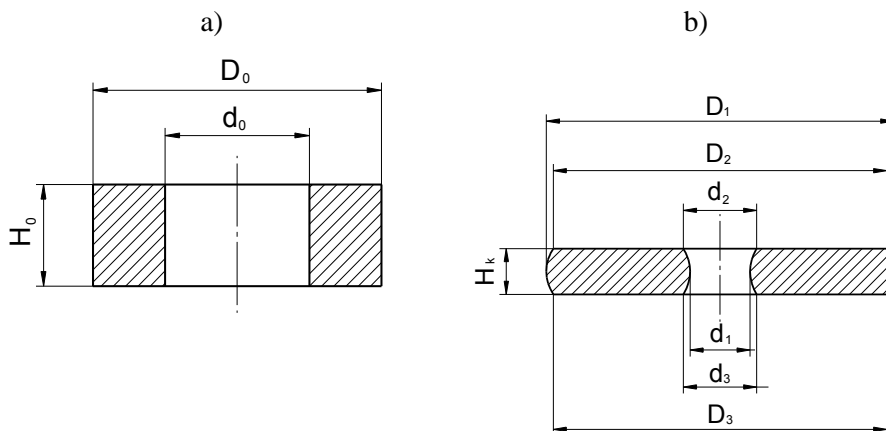
Rys. 3.13. Krzywe doświadczalne stopu AZ31 dla temperatury 500°C [1, 76, 98]

3.3 Badanie warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania plastycznego

Bardzo ważną rolę w procesach obróbki plastycznej odgrywa tarcie występujące między odkształcanym plastycznie metalem a narzędziem. Siły tarcia determinują zarówno przebieg procesu, jak też rzutują na uzyskane własności wyrobów. Warunki tarcia zależne są od parametrów procesu takich jak temperatura, prędkość odkształcenia, rodzaj smarowania itp. Stąd za celowe uznano określenie wpływu parametrów procesu na wartość współczynnika tarcia μ i czynnika tarcia m dla pary trącej stopy magnezu–stal narzędziowa w zakresie temperatur 250°C–450°C. Badania wykonano dla potrzeb modelowania procesów kucia odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu. Oczekuje się, że opisane badania warunków tarcia przy różnych temperaturach kształtowania badanych stopów spowodują wzrost dokładności obliczeń numerycznych. Na podstawie uzyskanych wyników określona również zostanie skuteczność wybranych smarów w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, co stanowić będzie ważną informację do dalszych badań.

3.3.1 Metodyka badawcza

Badania warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania plastycznego wybranych stopów magnezu przeprowadzono metodą spęczania próbki pierścieniowej. Próbki o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_0=20$ mm, średnica wewnętrzna $d_0=10$ mm i wysokości $H_0=7$ mm ze stopu MgAl4Zn i AZ31 (rys. 3.14 a, 3.15, 3.16) nagrzewano w piecu elektrycznym oporowym do temperatur: 250°C, 350°C, 450°C.



Rys. 3.14. Szkic próbki stosowanej w badaniach doświadczalnych: a) pierścień stosowany w próbie spęczania, b) wielkości mierzone po spęczeniu próbek pierścieniowych



Rys. 3.15. Próbki pierścieniowe ze stopu magnezu MgAl4Zn przygotowane do badań warunków tarcia



Rys. 3.16. Próbkę pierścieniowe ze stopu magnezu AZ31 przygotowane do badań warunków tarcia

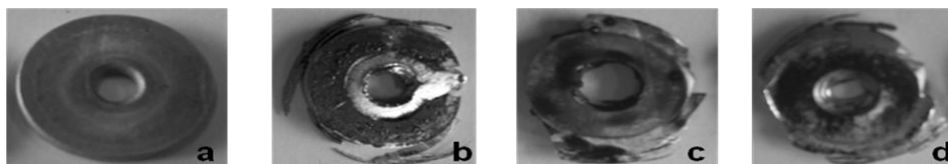
Następnie pierścienie spęczono między stalowymi płytami w trójsuwakowej prasie kuzniczej ze smarowaniem i bez smarowania do wysokości H_k mniejszej od połowy wysokości początkowej H_0 [8]. Wartość czynnika i współczynnika tarcia wyznaczano poprzez porównywanie wymiarów próbki uzyskanych w doświadczeniu z wymiarami obliczonymi w symulacjach MES. Analiza wyników przy użyciu metody elementów skończonych umożliwiła uwzględnienie szeregu zjawisk takich jak: wymiana ciepła podczas przenoszenia próbki z pieca na narzędzia, wymiana ciepła pomiędzy próbką i narzędziem, które są pomijane przy konwencjonalnej metodzie wyznaczania współczynnika tarcia z nomogramów Burgdorfa. Taka metodyka interpretacji wyników badań jest pracochłonna jednak dużo dokładniejsza od odczytu z krzywych kalibracji (nomogramów) obrazujących zależność średnicy wewnętrznej w funkcji wysokości próbki dla różnych wartości współczynnika lub czynnika tarcia.

Dla stopu magnezu MgAl4Zn zastosowano trzy rodzaje środków smarnych: „akwagrafit CP”, smar na bazie dwusiarczku molibdenu „Molykote Longterm 2 plus” oraz łój z grafitem [3]. Po tej weryfikacji dla stopu AZ31 zastosowano dwa najskuteczniejsze smary: dwusiarczek molibdenu i łój z grafitem. W każdych warunkach próby powtarzano minimum trzy razy a wyniki uśredniano.

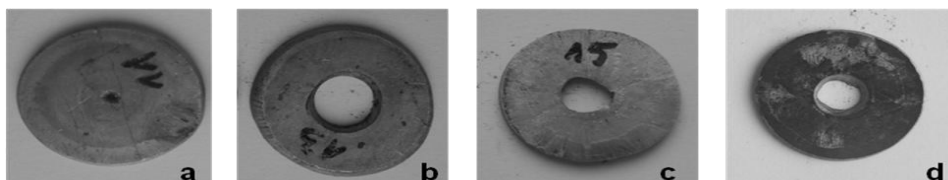
„Akwagrafit CP” jest smarem wykorzystywanym w procesie kucia matrycowego na gorąco w szczególności odkuwek ze stali. Występuje w postaci suspensji wodnych w rozcieńczeniu od 1:5 do 1:20 w zależności od warunków procesu kucia. Zawiera w swoim składzie grafit oraz dodatki stabilizujące i zwilżające. Plastyczny smar z dwusiarczkiem molibdenu „Molykote Longterm 2 plus” jest wodoodpornym środkiem smarnym na bazie oleju mineralnego. Ten półpłynny smar używany jest w procesach obróbki na gorąco oraz na silnie obciążone łożyska, wpusty, łączniki i elementy przeniesienia napędu w pojazdach ciężkich [26]. Zapewnia dobre własności smarne w zakresie temperatur od -25 do 1300°C. Smar stały w postaci łożu z grafitem otrzymuje się z tłuszczów zwierzęcych i grafitu. Stosuje się go do smarowania otwartych przekładni łańcuchowych i matryc kuzniczych [75]. Omówione powyżej smary są stosowane również w warunkach przemysłowych do kucia na gorąco stopów metali nieżelaznych.

3.3.2 Wyniki badań i ich analiza

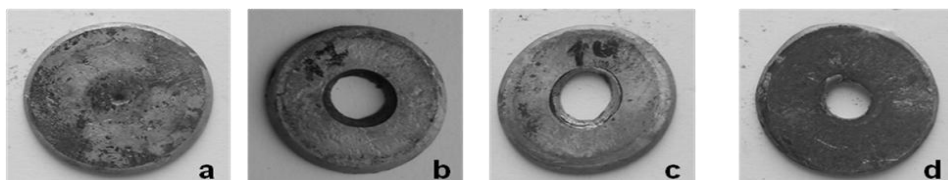
Przykładowe próbki po spęczeniu przedstawiono na rys. 3.17÷3.19 dla stopu MgAl4Zn oraz na rys. 3.20÷3.22 dla stopu AZ31.



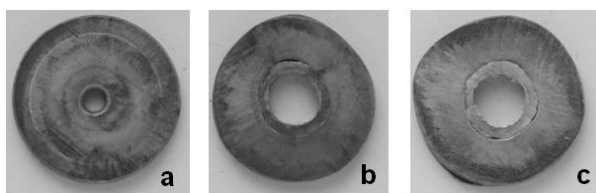
Rys. 3.17. Spęczone próbki ze stopu magnezu MgAl4Zn nagrzane do temperatury 250°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łojem z grafitem, d) ze smarowaniem akwagrafitem



Rys. 3.18. Spęczone próbki ze stopu magnezu MgAl4Zn nagrzane do temperatury 350°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łojem z grafitem, d) ze smarowaniem akwagrafitem



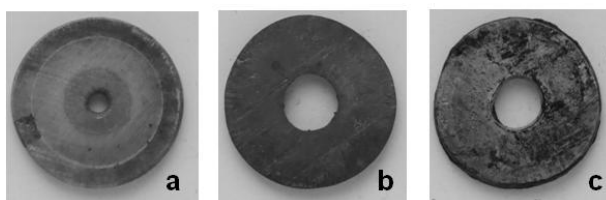
Rys. 3.19. Spęczone próbki ze stopu magnezu MgAl4Zn nagrzane do temperatury 450°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łojem z grafitem, d) ze smarowaniem akwagrafitem



Rys. 3.20. Spęczone próbki ze stopu magnezu AZ31 nagrzane do temperatury 250°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łojem z grafitem



Rys. 3.21. Spęćzone próbki ze stopu magnezu AZ31 nagrzane do temperatury 350°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łożem z grafitem



Rys. 3.22. Spęćzone próbki ze stopu magnezu AZ31 nagrzane do temperatury 450°C:
a) bez smarowania, b) ze smarowaniem dwusiarczkiem molibdenu, c) ze smarowaniem łożem z grafitem

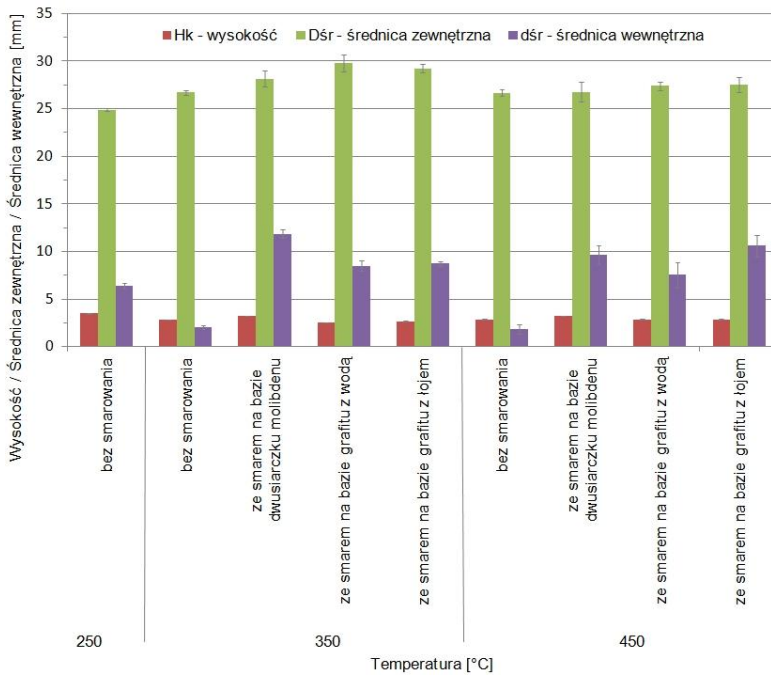
Dokonano pomiaru wysokości oraz średnic zewnętrznych i wewnętrznych próbek ze stopów MgAl4Zn i AZ31 spęćzonych przy różnych warunkach tarcia. Z uwagi na kształt „spęćzek” często odbiegający od osiowo symetrycznego wykonano po trzy pomiary w różnych płaszczyznach i wyniki uśredniono. Na rys. 3.23 i rys. 3.24 przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów przykładowych spęćzonych próbek uzyskanych z prób doświadczalnych.

W przypadku spęćzania próbek ze stopu MgAl4Zn nagrzanych do temperatury 250°C z zastosowaniem smaru próbki uległy pęknięciu. Taki wynik uzyskano dla wszystkich stosowanych smarów. W związku z tym dla tych warunków nie wyznaczono współczynników i czynników tarcia.

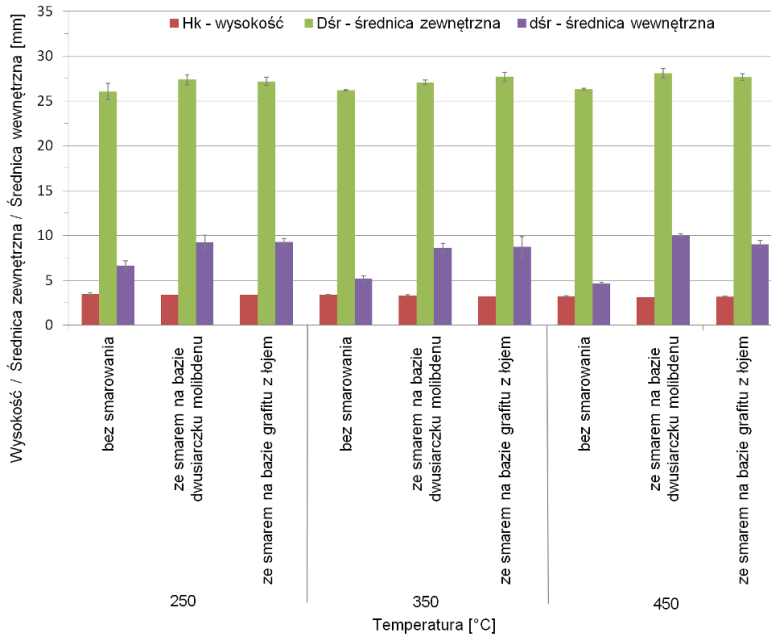
Przy pomiarach pierścieni po spęćczeniu zaobserwowano, że średnice wewnętrzna i zewnętrzna próbek ściśniętych bez smarowania są mniejsze od przypadku ze smarowaniem. Jest to wynikiem obecności sił tarcia przeciwdziałających swobodnemu przemieszczaniu się materiału próbki w kierunku promieniowym.

W celu wyznaczenia wartości współczynników i czynników tarcia wykonano obliczenia w środowisku programu Deform 3D bazującym na metodzie elementów skończonych. Model geometryczny procesu spęćzania pierścienia utworzony w wymienionym powyżej programie przedstawiono na rys. 3.25. Przy obliczeniach uwzględniono wymianę ciepła pomiędzy próbką i kowadłami, generowanie ciepła na skutek tarcia oraz zamiany energii mechanicznej na ciepłą.

3. Badania własności wybranych stopów magnezu

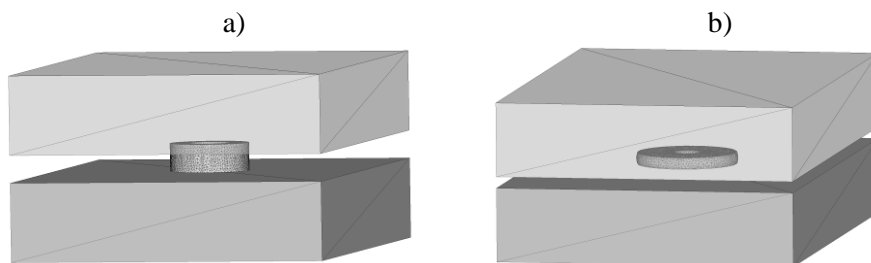


Rys. 3.23. Przykładowe wymiary wybranych próbek po spęczeniu dla stopu MgAl₄Zn



Rys. 3.24. Przykładowe wymiary wybranych próbek po spęczeniu dla stopu AZ31

Stosując dostępne w programie modele tarcia (Coulomba i tarcia stałego) przeprowadzono szereg symulacji, zmieniając wartości współczynnika tarcia μ i czynnika m w taki sposób, aby uzyskać najlepszą zbieżność pomiędzy teoretycznymi i doświadczalnymi wymiarami próbek [67, 85].



Rys. 3.25. Model geometryczny procesu spęczniania pierścienia w środowisku programu Deform 3D: a) początek procesu, b) koniec procesu

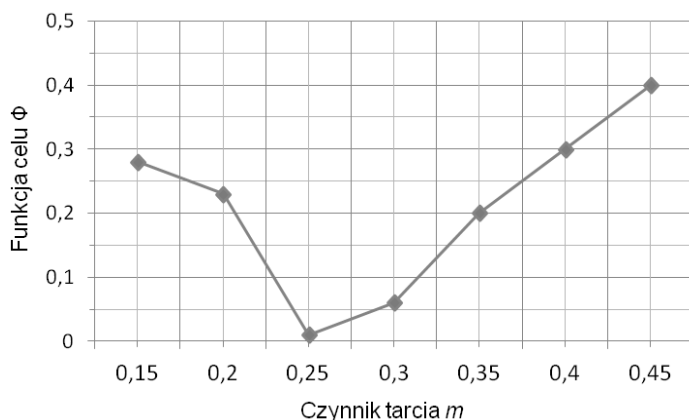
Optymalne wartości współczynnika lub czynnika tarcia wyznaczone na podstawie najmniejszych wartości funkcji (3.5) określającej odchylenie wartości teoretycznych od doświadczalnych, wyrażonej zależnością:

$$\Phi_d = \left| \frac{D_d - D_t}{D_d} \right| + \left| \frac{d_d - d_t}{d_t} \right| \quad (3.5)$$

gdzie:

- D_d – średnia średnica zewnętrzna próbki uzyskana w doświadczeniu,
- D_t – średnia średnica zewnętrzna próbki uzyskana w symulacji,
- d_d – średnia średnica wewnętrzna próbki uzyskana w doświadczeniu,
- d_t – średnia średnica wewnętrzna próbki uzyskana w symulacji.

Procedurę wyznaczania czynnika i współczynnika tarcia, na podstawie minimalizowania funkcji celu, prowadzono dwustopniowo. Wstępnie w wykonywanych symulacjach zmieniano wartości czynnika tarcia z krokiem co 0,05, a następnie w pobliżu określonego minimum ze skokiem 0,01. W ten sposób zdecydowanie zmniejszył się czas określenia minimum funkcji celu z dokładnością do 0,01. Na rys. 3.26 przedstawiono przykładowe wyniki z pierwszego etapu obliczeń dla przypadku spęczniania stopu magnezu AZ31 ze smarowaniem łożem z grafitem przy temperaturze nagrzewania próbki $t = 450^\circ\text{C}$.



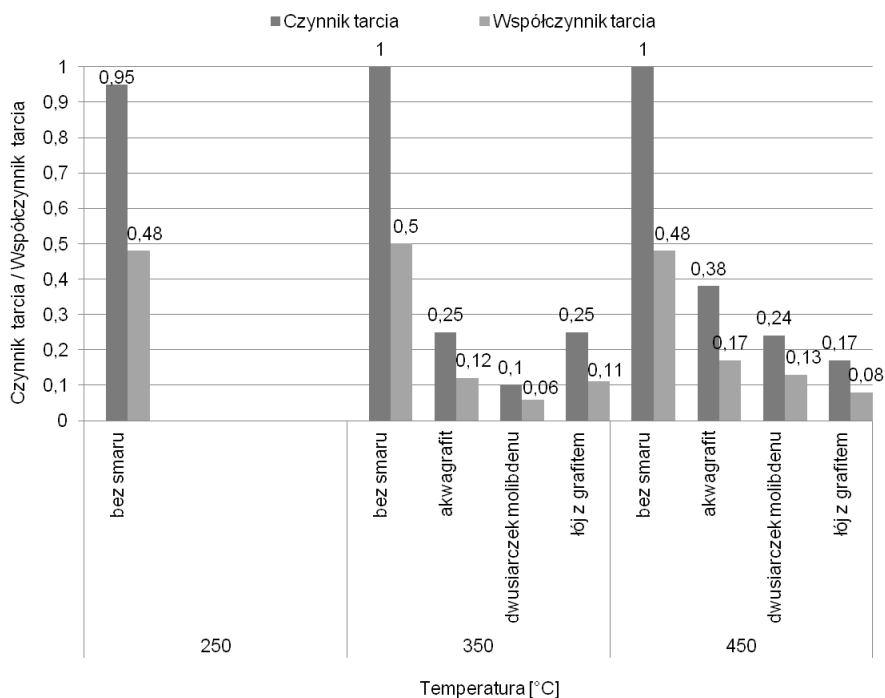
Rys. 3.26. Zależność funkcji celu Φ od czynnika tarcia dla stopu magnezu AZ31 przy temperaturze 450°C z zastosowaniem smaru na bazie łożu z grafitem

Na zamieszczonym wykresie można zauważyć, że funkcja celu Φ przyjmuje wartość minimalną dla pewnej wartości czynnika tarcia, w tym rozpatrywanym przypadku dla $m = 0,25$. Wartość tą uznano za optymalną dla danych warunków próby. Uzyskane z symulacji wartości współczynników i czynników tarcia dla stopu MgAl4Zn i AZ31 dla najmniejszej wartości funkcji przedstawiono w tabeli 3.4.

Tab. 3.1. Optymalne wartości współczynników i czynników tarcia dla stopów magnezu MgAl4Zn i AZ31

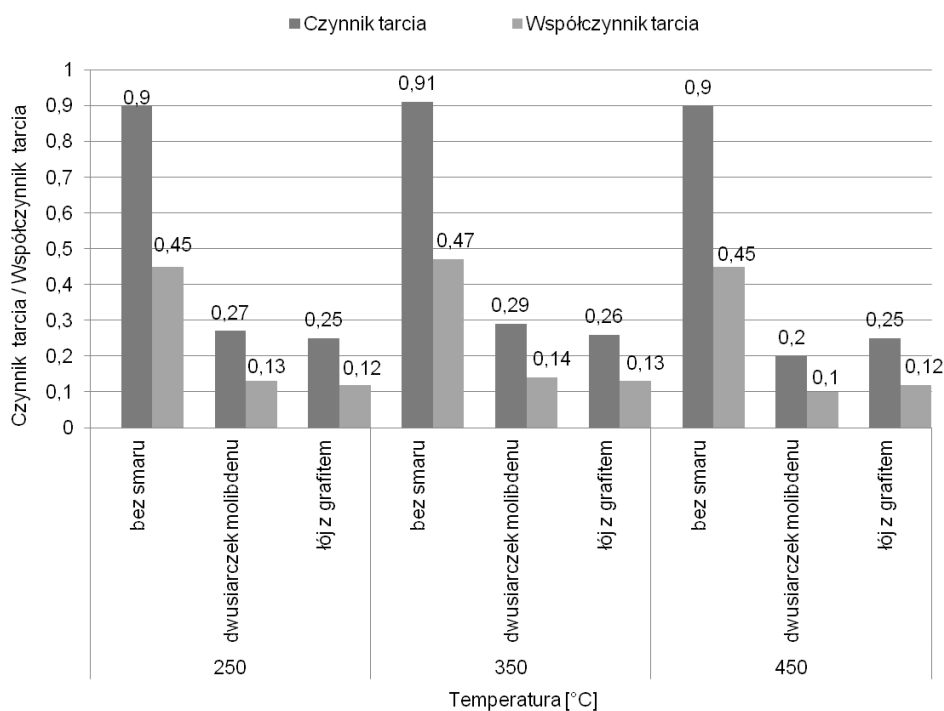
Rodzaj stopu	Temp. [°C]	Spęzione próbki:							
		bez smaru		ze smarem na bazie dw. molibdenu		ze smarem na bazie łożu z grafitem		ze smarem „akwagrafitem”	
		wsp. μ	czyn. m	wsp. μ	czyn. m	wsp. μ	czyn. m	wsp. μ	czyn. m
MgAl4Zn	250	0,48	0,95	-	-	-	-	-	-
	350	0,5	1	0,06	0,1	0,11	0,25	0,12	0,25
	450	0,48	1	0,13	0,24	0,08	0,17	0,17	0,38
AZ31	250	0,45	0,90	0,13	0,27	0,12	0,25	-	-
	350	0,47	0,91	0,14	0,29	0,13	0,26	-	-
	450	0,45	0,90	0,10	0,20	0,12	0,25	-	-

Zależności współczynników i czynników tarcia od temperatury nagrzewania próbki dla dwóch analizowanych stopów magnezu przedstawiono odpowiednio na rys. 3.27 i 3.28. Analizując zależność czynnika i współczynnika tarcia od temperatury nagrzewania próbki MgAl4Zn przy zastosowaniu różnych smarów przedstawioną na rys. 3.27 stwierdzono, iż przy odkształcaniu bez smarowania występuje tarcie graniczne lub bliskie granicznemu ($m=1$ i $\mu=0,5$). Zdecydowana poprawa warunków tarcia dla stopu magnezu MgAl4Zn jest widoczna przy zastosowaniu wybranych smarów. Najlepsze efekty wykazuje smar na bazie dwusiarczku molibdenu i łożu z grafitem. Należy zauważyć, że wszystkie próbki spęczone w temp. 250°C ze smarowaniem popękały (rys. 3.17b – 3.17d), co wiąże się z małą plastycznością tego gatunku stopu w tej temperaturze. Próbkę spęczoną bez smarowania w tej samej temperaturze nie uległy pęknięciu gdyż, w tym przypadku występuje duże tarcie przeciwdziałające promieniomu płynięciu materiału. W związku z tym średnica próbki nie powiększa się w tak dużym stopniu jak w przypadku ze smarowaniem. Skutkiem tego są dużo mniejsze obwodowe naprężenia rozciągające na zewnętrznej krawędzi próbki.



Rys. 3.27. Zależność czynnika i współczynnika tarcia od temperatury nagrzewania próbki dla pary trącej stop MgAl4Zn – stal narzędziowa przy zastosowaniu różnych smarów

W przypadku odkształcania stopu magnezu AZ31 bez smarowania pomiędzy materiałem odkształcanym i narzędziem w całym zakresie badanych temperatur występuje tarcie bliskie granicznemu (rys. 3.28). Czynniki tarcia osiąga wartości $m=0,9\pm 0,91$, natomiast współczynniki tarcia $\mu=0,45\pm 0,47$. Stop magnezu AZ31 w temperaturze 250°C charakteryzuje się nieznacznie większą plastycznością niż stop MgAl4Zn. Świadczą o tym mniejsze pęknięcia we wszystkich próbkach odkształconych w tej temperaturze ze smarowaniem dostępnymi środkami smarnymi. W każdej z badanych temperatur smar zawierający dwusiarczek molibdenu oraz łój z grafitem zapewniły najmniejsze tarcie. Skuteczność tych środków smarnych wyrażona wartościami współczynników i czynników tarcia jest w przybliżonym zakresie, które wynoszą odpowiednio dla pierwszego rozpatrywanego smaru $m=0,2\pm 0,29$; $\mu=0,1\pm 0,14$ oraz dla drugiego $m=0,25\pm 0,26$; $\mu=0,12\pm 0,13$.



Rys. 3.28. Zależność czynnika i współczynnika tarcia od temperatury nagrzewania próbki dla pary trącej stop AZ31 – stal narzędziowa przy zastosowaniu różnych smarów

4. ANALIZA TEORETYCZNA PROCESÓW KSZTAŁTOWANIA ODKUWEK PŁASKICH Z ŻEBRAMI ZE STOPÓW MAGNEZU

Analizę teoretyczną nowych procesów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu w trójsuwakowej prasie kuźniczej wykonano na podstawie symulacji komputerowych. Do obliczeń zastosowano program Deform 3D oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Obecnie przy projektowaniu nowych technologii stosowanie symulacji numerycznych jest bardzo popularne ze względu na wynikające z tego korzyści. Główną ich zaletą jest możliwość wielowariantowej analizy i optymalizacji parametrów na etapie planowania procesu. Zastosowanie MES do symulacji procesów pozwala na dokładne prześledzenie kinematyki płynięcia materiału, a dzięki temu zaobserwowanie ewentualnych negatywnych zjawisk mogących zakłócić prawidłowy ich przebieg [13, 78, 79]. Pozwala to dokładniej zaplanować przebieg badań, co przekłada się na znaczne oszczędności czasu i nakładów finansowych oraz zwiększenie pewności przyjętych rozwiązań [14, 29, 86]. Podobne podejście wykorzystano w niniejszym rozdziale, którego celem jest określenie istotnych parametrów procesów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu oraz identyfikacja zjawisk ograniczających na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych.

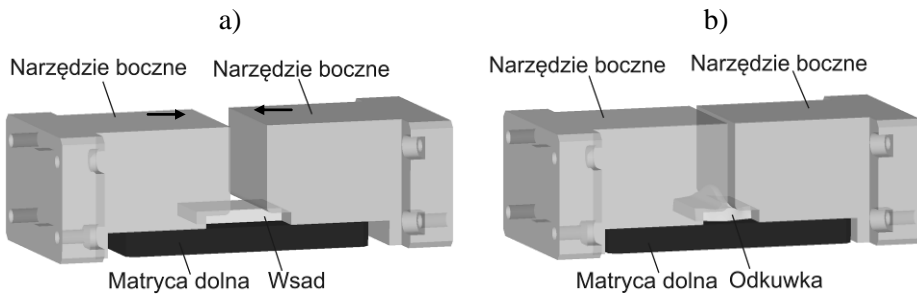
4.1 Analiza teoretyczna procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem

4.1.1 Metodyka badawcza

Analizę teoretyczną kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem w trójsuwakowej prasie kuźniczej (TPK) przeprowadzono dla trzech założonych wariantów procesu:

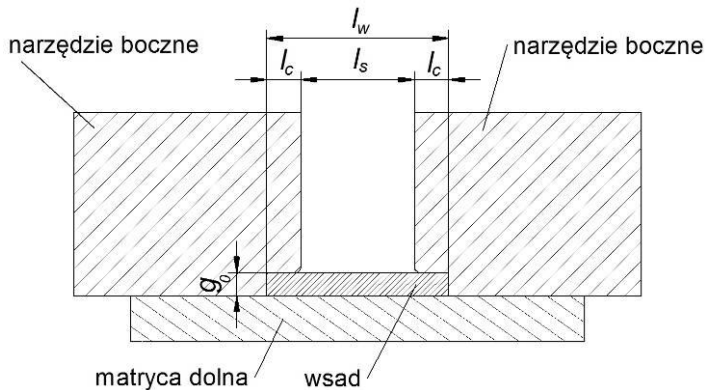
- kształtowania półswobodnego,
- kształtowania w wykroju zamkniętym,
- kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żebrzem o zarysie trójkątnym.

Założono, że kształtowanie półswobodne odkuwki płaskiej z jednym żebrzem realizowane będzie według schematu przedstawionego na rys. 4.1.



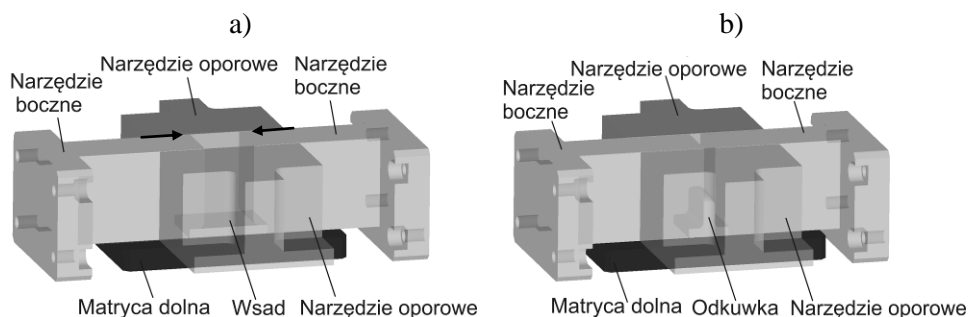
Rys. 4.1. Schemat kształtowania półswobodnego odkuwki płaskiej z jednym zębem:
a) początek procesu, b) koniec procesu

Wsad w postaci prostopadłościanu umieszczony jest na matrycy dolnej pomiędzy identycznymi narzędziami bocznymi. Narzędzia te w trakcie trwania procesu przemieszczają się ruchem posuwistym ze stałą prędkością co skutkuje spęczaniem środkowej części wsadu. Kształtowanie zębra o założonych wymiarach wyrobu gotowego przebiega w przestrzeni ograniczonej czołowymi powierzchniami narzędzi bocznych. Narzędzia nie ograniczają możliwości płynięcia materiału w kierunku prostopadłym do ich ruchu [22]. Odkuwka kształtowana jest w jednym przejściu, którego czas w przypadku stałej prędkości ruchu narzędzi bocznych, zależy wyłącznie od długości swobodnej spęczanego wsadu l_s będącej różnicą długości wsadu l_w i długości czynnych narzędzi l_c zaznaczonych na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Wymiary charakterystyczne w procesie kształtowania odkuwki płaskiej z jednym zębem w TPK: l_w – długość wsadu, g_0 – grubość wsadu, l_c – długość czynna narzędzi, l_s – długość swobodna spęczanego wsadu ($l_s = l_w - 2l_c$)

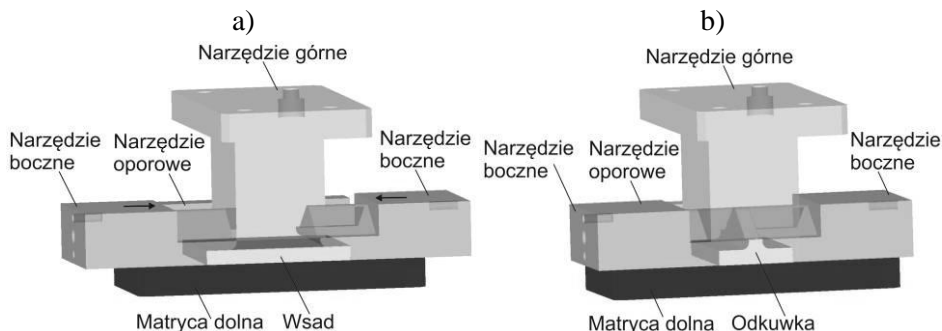
Schemat procesu kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwki płaskiej z jednym zębem w TPK przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym wyrobu płaskiego z jednym zębem:
a) początek procesu, b) koniec procesu

W przypadku kształtowania w wykroju zamkniętym zastosowano dodatkowe narzędzia oporowe ograniczające możliwość pływnięcia materiału w kierunku prostopadłym do ruchu narzędzi bocznych. W początkowym etapie procesu wsad w kształcie prostopadłościanu umieszcza się w wykroju zamkniętym na matrycy dolnej pomiędzy narzędziami. Następnie spęcza się go przy użyciu bocznych narzędzi, które zbliżają się do siebie ruchem postępowym ze stałą prędkością. Przemieszczające się narzędzia boczne wyciskają środkową część wsadu w górną przestrzeń wykroju, dzięki czemu kształtuje się znacznie wyższe zębro niż przy wariacie półswobodnym [28].

Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwki płaskiej z jednym zębem o zarysie trójkątnym przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Schemat kształtowania odkuwki płaskiej z jednym zębem o zarysie trójkątnym:
a) początek procesu (narzędzie oporowe zostało ukryte w celu lepszego zobrazowania procesu), b) koniec procesu

W pierwszym etapie procesu wsad w postaci prostopadłościanu umieszczany jest w wykroju zamkniętym na dolnej matrycy, pomiędzy narzędziami bocznymi i oporowymi. Następnie zaciskany jest przy pomocy górnego narzędzia z wgłębieniem o zarysie trójkątnym. W kolejnym etapie następuje odkształcanie wsadu,

które odbywa się w wyniku spęczania materiału bocznymi narzędziami zbliżającymi się do siebie w płaszczyźnie poziomej. Materiał w środkowej części wsadu jest wyciskany w przestrzeń wykroju górnego narzędzia, w wyniku czego kształtowane jest zgrubienie w postaci żebra o zarysie trójkątnym [23].

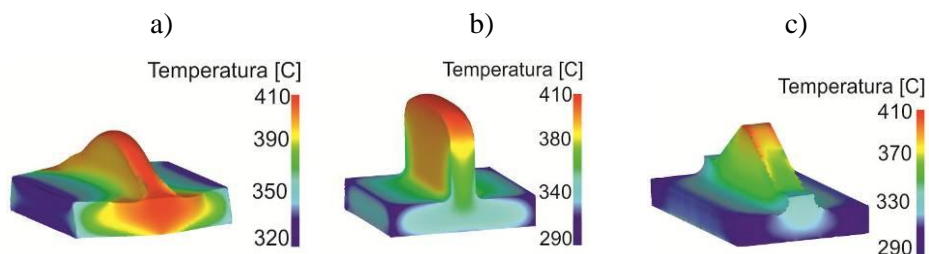
Badania teoretyczne założonych trzech wariantów procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem w TPK przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych wykorzystując do tego celu komercyjny program Deform 3D. Symulacje komputerowe badanych procesów wykonano przy założeniu przestrzennego stanu odkształcenia stosując pełny model termomechaniczny. Wsad i wszystkie narzędzia zamodelowano w programie Solid Edge, po czym zaimportowano do programu Deform 3D. Materiał wsadowy ma kształt prostopadłościanu o wymiarach: grubość $g_0=9,5$ mm, szerokość $s_0=50$ mm i długość l_w zmieniana w zakresie $68\div 84$ mm co 1 mm dla procesu kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym. Dla wariantu kucia odkuwek z żebrzem o zarysie trójkątnym wymiary odpowiednio wynoszą: $g_0 = 9,5$ mm, $s_0=92$ mm, l_w z przedziału $68\div 84$ mm zmieniane co 1 mm. Wsad zamodelowano jako obiekt sztywno-plastyczny podzielony na 100 tys. elementów tetragonalnych. Do symulacji użyto model materiałowy stopu MgAl4Zn i AZ31 wyznaczony w badaniach doświadczalnych opisanych w rozdziale 3.1. W obliczeniach przyjęto, że wsad ze stopów magnezu nagrany jest do temperatury 410°C , zaś temperatura narzędzi w trakcie procesu jest stała i wynosi 250°C . Pozostałe parametry przyjmowane w obliczeniach to: długość czynna narzędzi $l_c=20$ mm do kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym, zaś w przypadku odkuwek z żebrzem trójkątnym l_c wynosi 21 mm; prędkość ruchu narzędzi $v=6$ mm/s odpowiadająca obecnym parametrom TPK; czynnik tarcia na powierzchni styku metal-narzędzie bez smarowania dla MgAl4Zn $m=1$ i AZ31 $m=0,9$, zaś ze smarowaniem łojem z grafitem dla MgAl4Zn $m=0,17$ i AZ31 $m=0,25$ (wartości przyjęte z badań własnych opisanych w rozdziale 3.2.); współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem – $4,5$ kW/m²K oraz między materiałem a otoczeniem – $0,03$ kW/m²K [84].

Głównym celem przeprowadzenia symulacji komputerowych było sprawdzenie poprawności założonych metod oraz określenie wpływu podstawowych parametrów technologicznych na przebieg procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem w trójsuwakowej prasie kuźniczej.

4.1.2 Wyniki symulacji numerycznych

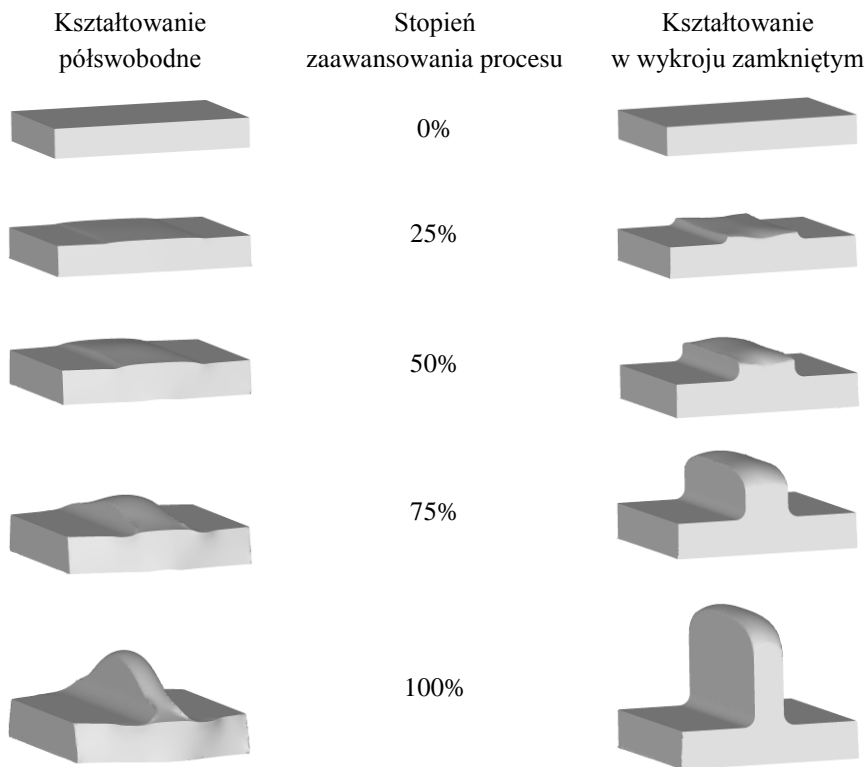
Przeprowadzone obliczenia numeryczne potwierdziły słuszność opracowanych sposobów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem według założonych koncepcji. Dla odkuwek ze stopu MgAl4Zn i AZ31 uzyskano bardzo zbliżone wyniki. Zauważalne różnice wystąpiły w wartości naprężeń i sił kształtowania. Pozostałe parametry procesu nie wykazywały istotnych różnic. W związku z tym

wyniki symulacji przedstawiono na przykłaździe stopu AZ31, dla którego przeprowadzono pełne badania doświadczalne dla wszystkich wariantów procesu w trójswakowej prasie kuźniczej. Na podstawie wyników symulacji numerycznych określono zakres parametrów technologicznych, przy których procesy przebiegają prawidłowo. Uzyskane odkuwki z jednym źebrem ze stopu AZ31 ukształtowane według opracowanych sposobów pokazano na rys. 4.5.



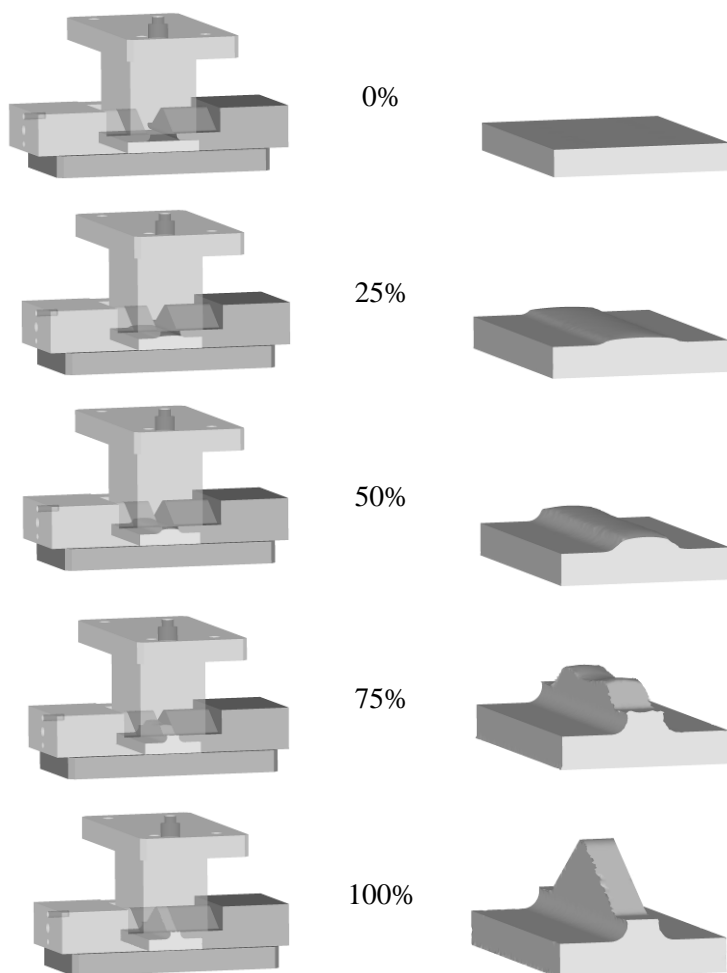
Rys. 4.5. Prawidłowy kształt odkuwki z jednym źebrem ze stopu AZ31 z pokazanym rozkłaźdem temperatur uzyskanej w procesie kucia: a) półswobodnego, b) w wykroju zamkniętym, c) w wykroju zamkniętym z źebrem o zarysie trójkątnym

Progresję ich kształtu w poszczególnych etapach zaawansowania procesu zestawiono na rys. 4.6 i 4.7. W zależności od koncepcji kucia wyrobów płaskich z jednym źebrem w TPK kształt odkuwek znacznie się różni. Podstawową różnicą jest kształt źebier. W wykroju zamkniętym otrzymano wysokie źebra o zarysie prostokątnym lub trójkątnym (rys. 4.5 b i c). W procesie kształtowania półswobodnego nie uzyskano takich rezultatów. Źebro jest niższe i wyraźnie zaokrąglone (rys. 4.5 a). Kolejną różnicą jest kształt podstawy odkuwki uźebrowanej. W wykroju zamkniętym ruch materiału na boki jest ograniczony przez narzędzia oporowe dzięki czemu uzyskano podstawę o regularnym kształcie. Natomiast odkuwka kształtowana metodą kucia półswobodnego ma poszerzoną podstawę o nieregularnym kształcie, co spowodowane jest płynięciem materiału na boki. Do głównych zalet kształtowania półswobodnego można zaliczyć: tańsze narzędzia, mniejsze naciski, łatwe umieszczenie materiału wsadowego. Natomiast wadą tego wariantu procesu jest otrzymywanie odkuwek z niskim źebrem o półokrągłym kształcie. Dodatkowo przy kształtowaniu półswobodnym występuje poszerzenie podstawy, która ma kształt nieregularny. Nieregularność tą należy usunąć, co dodatkowo zwiększa pracoźłonność i czasochłonność całego procesu oraz generuje straty materiału.



Rys. 4.6. Progresja kształtu odkuwki z jednym żebrzem w procesie kucia półswobodnego i w wykroju zamkniętym

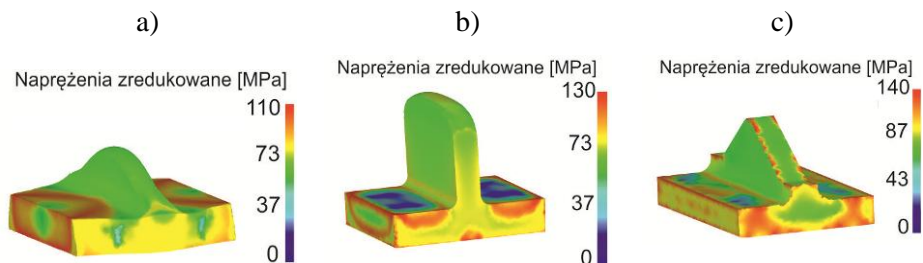
Do zalet kształtowania odkuwek płaskich w wykroju zamkniętym, w tym także z żebrzem o zarysie trójkątnym należą: możliwość uzyskania wysokich żeber o regularnym prostokątnym kształcie lub założonym trójkątnym zarysie, regularny kształt podstawy wyrobu dzięki czemu brak strat materiału. Kucie dokładnych odkuwek w wykroju zamkniętym wymaga jednak zastosowania droższych narzędzi, co jest główną wadą tej metody. Do innych ograniczeń można zaliczyć trudności w umieszczeniu materiału wsadowego w wykroju oraz duże naciski podczas kształtowania.



Rys. 4.7. Przebieg kształtowania odkuwki płaskiej z źebrem trójkątym ze stopu AZ31 w zależności od stopnia zawansowania procesu – wyniki MES

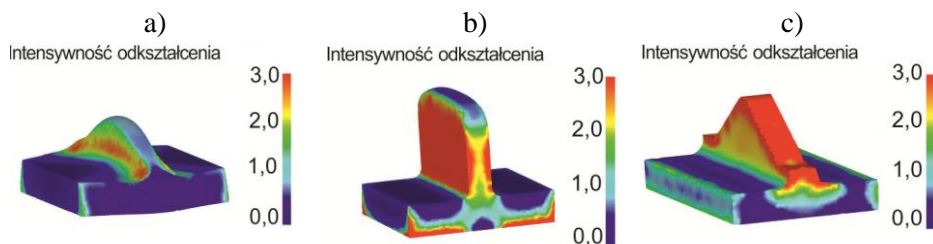
Rozkład naprężeń w odkuwce kształtowanej według trzech omawianych wariantów procesu przedstawiono na rys. 4.8. Maksymalne naprężenia w odkuwce kształtowanej półswobodnie wynoszą ok. 104 MPa. W przypadku odkuwki uzyskanej w wykroju zamkniętym największe wartości naprężenia osiągnęły wartość 122 MPa. Natomiast dla wariantu kucia w wykroju zamkniętym z źebrem trójkątym maksymalne naprężenia w odkuwce odnotowano na poziomie ok. 135 MPa. Dla dwóch rozpatrywanych wariantów kształtowania w wykroju zamkniętym stwierdzono, że największe wartości naprężenia występują w podstawie odkuwki w miejscu oddziaływania narzędzi bocznych oraz

narzędzi oporowych. Zauważalna jest różnica na górnej powierzchni podstawy, gdzie naprężenia są najmniejsze dla dwóch odkuwek otrzymanych w wykroju zamkniętym. Natomiast w tej samej strefie w odkuvce kształtowanej półswobodnie naprężenia te osiągają duże wartości. W odkuvce z zębem o zarysie trójkątnym duże wartości naprężeń odnotowano również na krawędzi zęba.



Rys. 4.8. Rozkład naprężeń w odkuvce z jednym zębem ze stopu AZ31 kształtowanej: a) półswobodnie, b) w wykroju zamkniętym, c) w wykroju zamkniętym z zębem o zarysie trójkątnym

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano m.in. rozkłady odkształceń w objętości wyrobu przedstawione na rys. 4.9. Analizując ten parametr w odkuvkach kształtowanych według założonych koncepcji można stwierdzić, że są one podobne. W trzech przypadkach największe wartości odkształceń występują w obszarze zębów. Spowodowane jest to tym, że materiał w tym miejscu jest intensywnie wyciskany do góry w otwartą przestrzeń ograniczoną powierzchniami narzędzi. Analizując te przypadki zauważono, że odkształcenia w strefie pod zębami znacznie od siebie odbiegają w odkuvkach kształtowanych w wykroju zamkniętym od odkuvki otrzymanej półswobodnie.

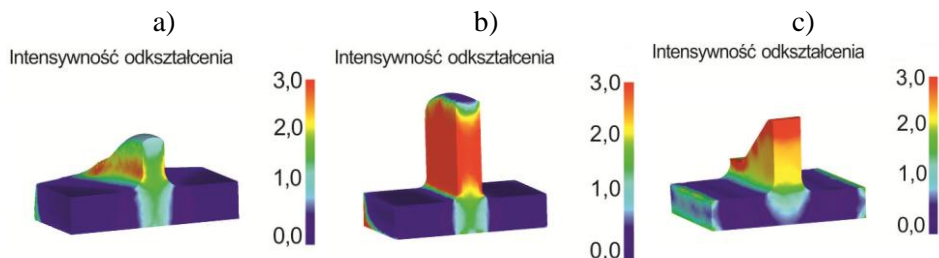


Rys. 4.9. Rozkład intensywności odkształceń w odkuvce z jednym zębem ze stopu AZ31 kształtowanej: a) półswobodnie, b) w wykroju zamkniętym, c) w wykroju zamkniętym z zębem o zarysie trójkątnym

W celu zweryfikowania tej różnicy wykonano przekrój poprzeczny odkuwek, który pokazano na rysunku 4.10. Jak widać odkształcenia w podstawie zębów są do siebie zbliżone. Różnica tkwi jedynie w strefie czołowej podstawy. Jest to spowodowane płynięciem materiału na boki przy kształtowaniu półswobodnym odkuvki.

Zastosowanie MES pozwoliło również określić siłę kształtowania dla trzech rozpatrywanych wariantów procesu. Teoretyczny przebieg sił zarejestrowany

podczas symulacji komputerowych dla analizowanych przypadków zostanie przedstawiony w dalszej części pracy przy opisie wyników badań doświadczalnych. Wartości siły teoretycznej i doświadczalnej zostaną zestawione na jednym wykresie dla każdego rozpatrywanego wariantu procesu.



Rys. 4.10. Rozkład intensywności odkształceń w przekroju odkuwek kształtowanych: a) półswobodnie, b) w wykroju zamkniętym, c) w wykroju zamkniętym z zębem o zarysie trójkątnym

4.1.3 Zjawiska ograniczające proces

Nieodpowiedni sposób realizacji procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym zębem w TPK skutkuje otrzymaniem wyrobu wadliwego. Analiza szerokiego zakresu parametrów technologicznych umożliwiła zidentyfikować zjawiska ograniczające proces, do których zaliczono: wyboczenie wsadu, zakucie, pęknięcie i błędy kształtu odkuwek.

Wyboczenie wsadu jest jednym z głównych zjawisk ograniczających proces kształtowania odkuwek płaskich z jednym zębem (rys. 4.11a). Pojawienie się wyboczenia zależy przede wszystkim od wartości współczynnika spęczania, który wyrażony jest zależnością:

$$k = \frac{l_s}{g_0} \quad (4.1)$$

gdzie:

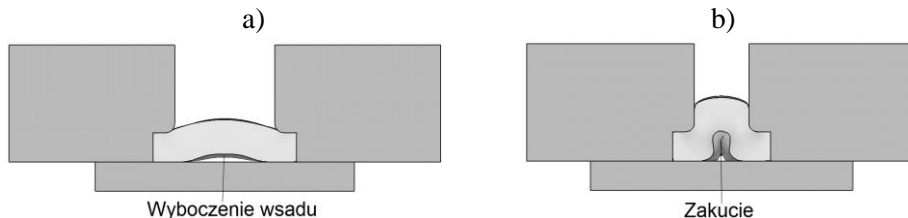
k – współczynnik spęczania,

l_s – długość swobodna spęczanego wsadu,

g_0 – grubość wsadu.

Parametry te zostały oznaczone na schemacie procesu przedstawionym na rysunku 4.2 w rozdziale 4.1.1. Istnieje pewna graniczna wartość współczynnika spęczania, po przekroczeniu której występuje wyboczenie wsadu. Jeżeli wyboczenie jest duże to przy dalszym kształtowaniu powstaje kolejne ograniczenie procesu w postaci zakucia w podstawie wyrobu (rys. 4.11 b). Występowanie zakucia w podstawie odkuwki dyskwalifikuje wyrób. Wyznaczenie granicznej wartości współczynnika k na podstawie wyników symulacji jest zadaniem trudnym, gdyż wyboczenie w modelu teoretycznym występuje znacznie później niż w rzeczywistym procesie [31]. Wynika to z wyidealizowanych warunków symulacji oraz

większej sztywności wsadu przy podziale na elementy dużo większe niż cząstki materiału rzeczywistego. Stwierdzono zatem, że graniczny współczynnik spęczenia zostanie wyznaczony w badaniach doświadczalnych.



Rys. 4.11. Schemat powstania zjawisk ograniczających proces: a) wyboczenia, b) zakucia w podstawie wyrobu

Kolejną wadą nieusuwalną, która może wystąpić przy kształtowaniu, w szczególności stopów magnezu, jest pęknięcie. Powstanie tej wady zależy głównie od plastyczności materiału w warunkach jego kształtowania oraz stanu naprężeń charakterystycznego dla danego procesu. Do analizy teoretycznej tego zjawiska dla badanych procesów wykorzystano kryterium zniszczenia według Cockrofta-Lathama [16] w postaci zmodyfikowanej zaimplementowanej w programie Deform 3D. Program ten wyznacza miejsca zagrożone pęknięciem w oparciu o to kryterium wyrażone wzorem:

$$\int_0^{\varepsilon_p} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H} d\varepsilon = C_1 \quad (4.2)$$

gdzie:

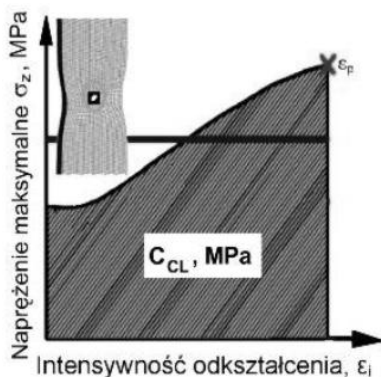
σ_{\max} – maksymalne naprężenie główne,

σ_H – naprężenia zastępcze według hipotezy Hubera,

ε – intensywność odkształcenia,

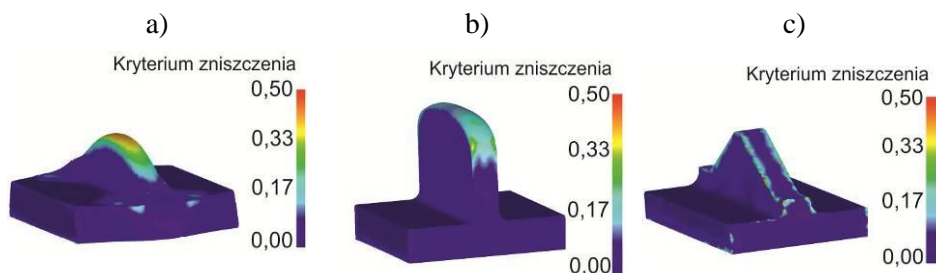
C_1 – wartość całki.

Kryterium C-L zakłada, że gdy praca wykonana przez naprężenia rozciągające przy jednorodnym rozciąganiu ($\sigma_{\max} = \sigma_z$) osiągnie pewną wartość krytyczną $C_1 = C_{CL}$, nastąpi plastyczne pęknięcie materiału. Interpretację geometryczną wzoru (4.2) przedstawiono na rysunku 4.12.



Rys. 4.12. Geometryczne odwzorowanie wskaźnika pęknięcia według kryterium Cocrofta-Lathama [81]

Na rysunku 4.13 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń MES obrazujące rozkład całki Cockrofta-Lathama (C-L) w odkuwkach z jednym źebrem ukształtowanych według trzech różnych wariantów procesu. Analiza kryterium zniszczenia wykazała, że największe niebezpieczeństwo pęknięć w badanych odkuwkach występuje na górnej powierzchni źebra. W tych obszarach odkuwki w czasie całego procesu przeważają naprężenia rozciągające, które są niekorzystne w aspekcie utraty spójności materiału. Największe wartości kryterium C-L uzyskano w przypadku półswobodnego kształtowania odkuwki (rys. 4.13a), co świadczy o tym, że w tym sposobie spośród analizowanych występuje największe niebezpieczeństwo pęknięcia.



Rys. 4.13. Rozkład kryterium zniszczenia według Cockrofta-Lathama w odkuwce z jednym źebrem ze stopu AZ31 kształtowanej: a) półswobodnie, b) w wykoju zamkniętym, c) w wykoju zamkniętym z źebrem o zarysie trójkątnym

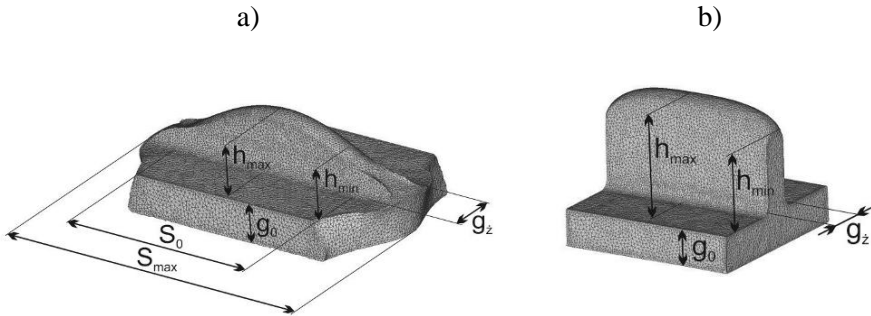
Istnieją również inne niekorzystne zjawiska związane z błędami kształtu odkuwki, które można wyeliminować poprzez dodatkowe procesy uzdatniające wyrób. Zastosowanie dodatkowych operacji powoduje jednak zmniejszenie efektywności procesu. Jednym z takich zjawisk jest poszerzenie podstawy wyrobu (rys. 4.14). Wada ta występuje tylko podczas kształtowania półswobodnego. W tym

procesie nie uczestniczą narzędzia oporowe ograniczające płynięcie materiału na boki. W celu uzyskania gotowej części konieczne jest usunięcie nadmiaru materiału, co zwiększa materiałochłonność oraz pracochłonność całego procesu. Za miarę tego zniekształcenia przyjęto współczynnik poszerzenia wyrażony jako:

$$A_s = s_{max}/s_0 \quad (4.3)$$

gdzie:

s_{max} – maksymalna szerokość podstawy,
 s_0 – szerokość początkowa wsadu.



Rys. 4.14. Wady kształtu odkuwki z jednym zębem: a) poszerzenie podstawy i nierównomierność zębra w procesie kucia półswobodnego, b) nierównomierność zębra w procesie kucia w wykroju zamkniętym

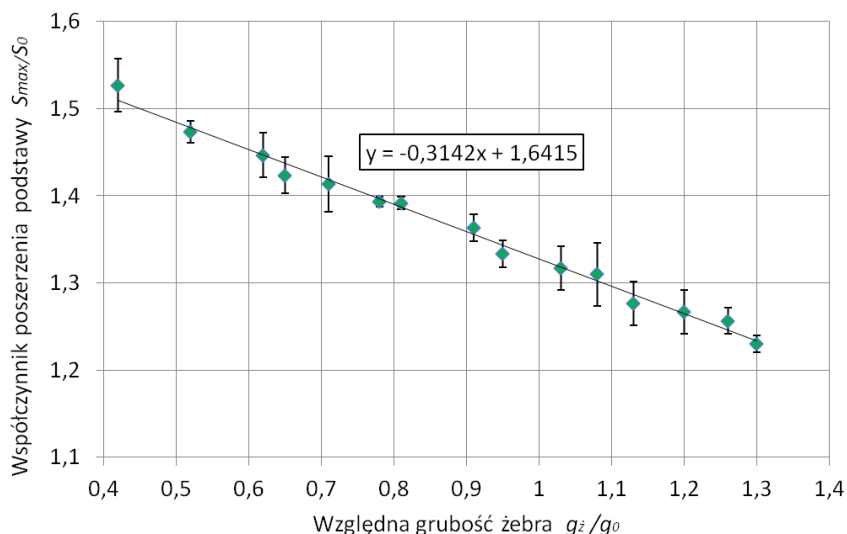
Na rys. 4.15 przedstawiono zależność współczynnika poszerzenia A_s od grubości względnej zębra odniesionej do grubości wsadu (g_z/g_0). Z danych zamieszczonych na wykresie wynika, że im mniejsza grubość kształtowanego zębra tym poszerzenie jest większe, przy czym zależność ta ma charakter liniowy. Na podstawie wyników symulacji sporządzono również wykres zależności pomiędzy współczynnikiem poszerzenia A_s a czynnikiem tarcia m dla różnych grubości zębra odkuwki ukształtowanej półswobodnie (rys. 4.16). Jak wynika z uzyskanych rezultatów przy kształtowaniu ze smarowaniem w większości przypadków poszerzenie jest nieznacznie większe niż bez użycia środków smarnych.

Kolejna nierównomierność dotyczy zarysu zębra i występuje w dwóch wariantach procesu tj. kształtowaniu półswobodnym i w wykroju zamkniętym (rys. 4.14). Za miarę tej nierównomierności przyjęto współczynnik nierównomierności zębra wyrażony zależnością:

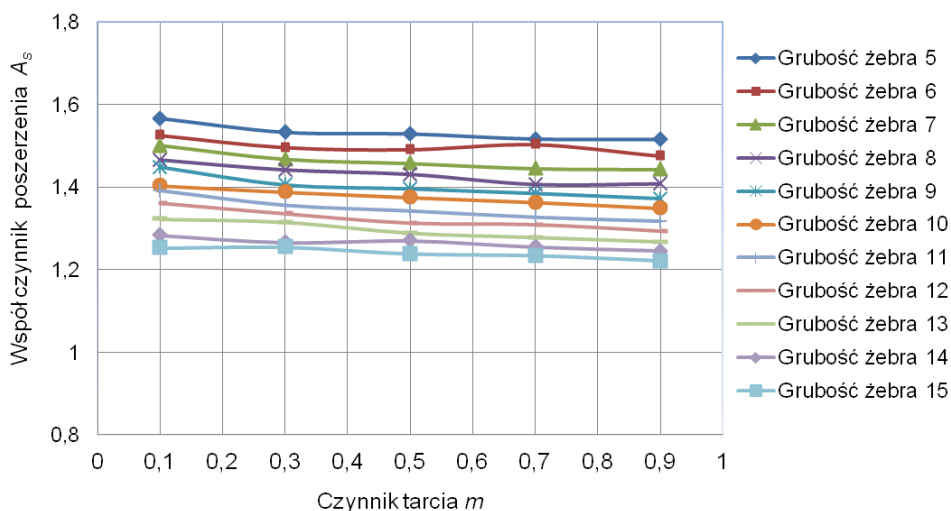
$$A_h = h_{max}/h_{min} \quad (4.4)$$

gdzie:

h_{max} – maksymalna wysokość zębra (mierzona w środku wysokości zębra),
 h_{min} – wysokość zębra po bokach (mierzona w płaszczyznach ograniczających szerokość odkuwki do 50 mm).



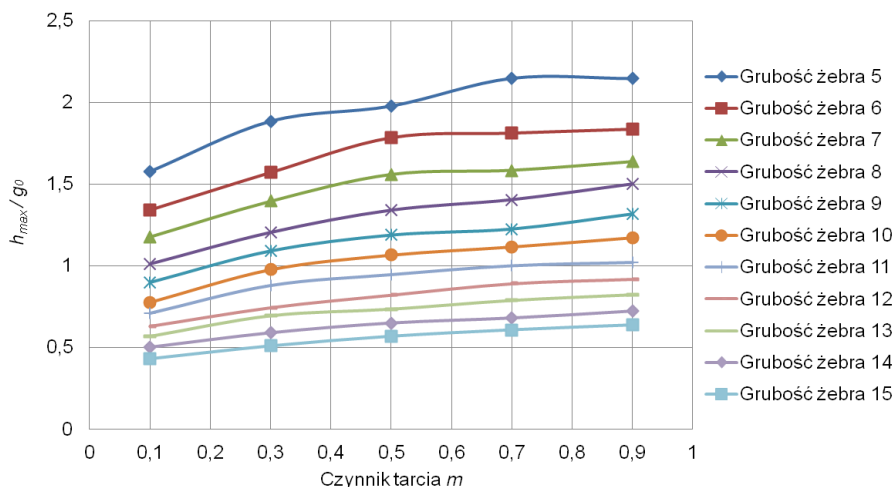
Rys. 4.15. Zależność współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości zębra



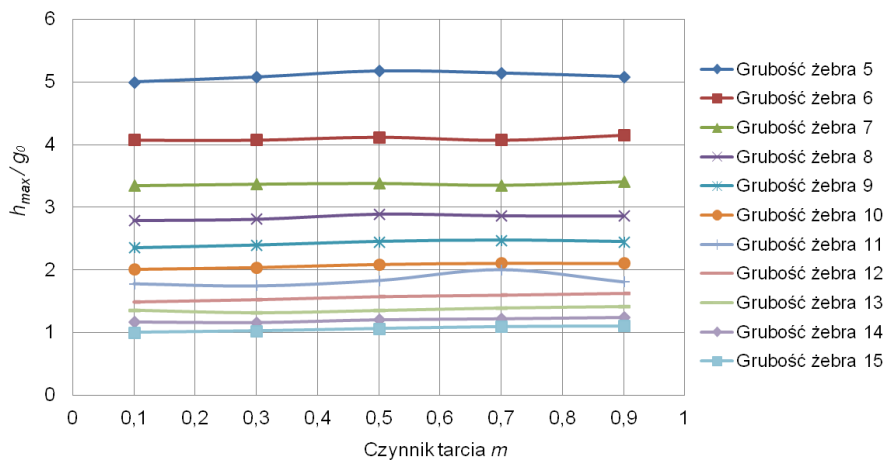
Rys. 4.16. Zależności pomiędzy współczynnikiem poszerzenia a czynnikiem tarcia dla różnych grubości zębra odkuwki ukształtowanej półsłobodnie

Na rysunkach 4.17 i 4.18 przedstawiono wpływ warunków tarcia na maksymalną wysokość ukształtowanego zębra odniesioną do grubości wsadu dla dwóch analizowanych wariantów procesu. W przypadku kształtowania półsłobodnego zauważano, że wraz ze wzrostem wartości czynnika tarcia wysokość zębra odkuwki jest większa. W związku z tym dla tego wariantu stwierdzono, że kształtowanie bez smarowania zapewnia otrzymanie odkuwki z wyższym zębem.

Zmiana warunków tarcia przy kształtowaniu w wykroju zamkniętym nie wpływa znacząco na wysokość zębra odkuwki.



Rys. 4.17. Wykres zależności maksymalnej wysokości ukształtowanego zębra odniesioną do grubości wsadu od czynnika tarcia dla różnych grubości zębów ukształtowanych półswobodnie

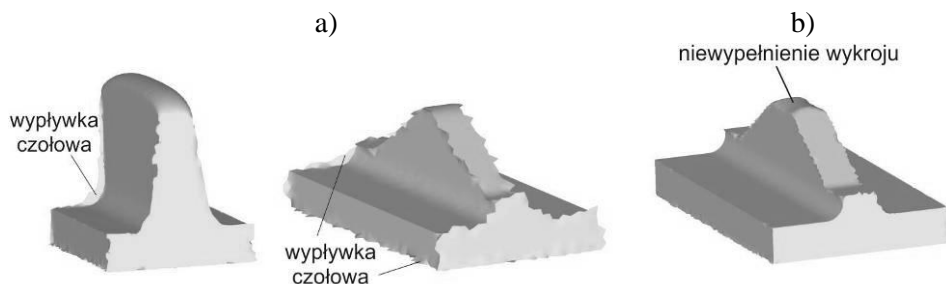


Rys. 4.18. Wykres zależności maksymalnej wysokości ukształtowanego zębra odniesioną do grubości wsadu od czynnika tarcia dla różnych grubości zębów ukształtowanych w wykroju zamkniętym

Na podstawie wyników symulacji stwierdzono, że w przypadku kształtowania półswobodnego współczynnik nierównomierności zarysu zębra A_h osiąga wartość 2,1 bez smarowania i 1,8 ze smarowaniem. Współczynnik ten jest dużo większy niż przy kształtowaniu w wykroju zamkniętym, dla którego $A_h=1,4$ dla warunków bez smarowania i przy użyciu środków smarnych. Wartość

współczynnika nierównomierności źebra jest w przybliźeniu stała i nie zależy od grubości źebra.

Kolejnym ograniczeniem, które może wystąpić w procesie kucia jest tworzenie się wypłytki czołowej (rys. 4.19 a). Powstaje ona w wyniku wciskania się materiału pomiędzy narzędzia. W takim przypadku niezbędna jest dodatkowa operacja usuwania wypłytki, którą trudno zmechanizować z uwagi na możliwość położenia wypłytki w różnych płaszczyznach. Kolejnym zaobserwowanym ograniczeniem jest niewypełnienie wykroju (rys. 4.19 b), które zlokalizowano w okolicy źebra. Naprawienie tej wady jest niemożliwe. Główną przyczyną tego zjawiska jest niewłaściwy dobór objętości użytego wsadu lub zbyt mała siła kształtowania. Eliminacja występowania tej wady związana jest z koniecznością zastosowania odpowiednich wymiarów wsadu lub maszyny kuźniczej o stosunkowo większych parametrach siłowych.



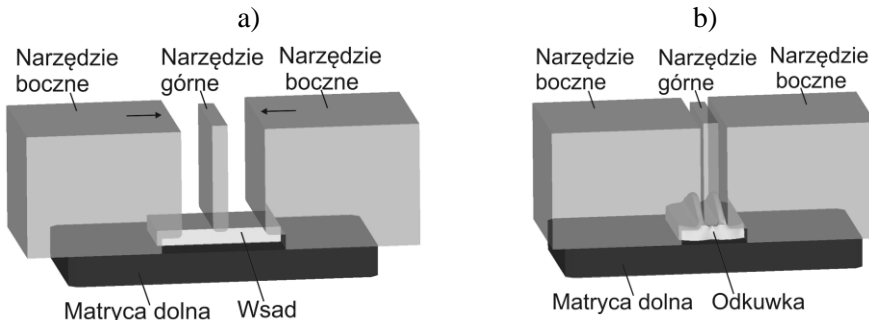
Rys. 4.19. Odkuwki z błędami kształtu: a) wypływka na powierzchni czołowej, b) niewypełnienie wykroju

4.2 Analiza teoretyczna procesów kształtowania odkuwek płaskich z dwoma źebami

4.2.1 Metodyka badawcza

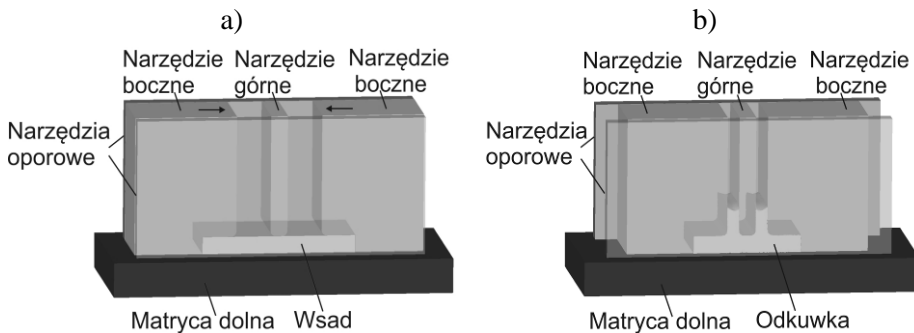
Założono, że proces kształtowania plastycznego odkuwek płaskich z dwoma źebami będzie realizowany w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Uwzględniając możliwości TPK opracowano dwa warianty procesu: kształtowanie półswobodne i kształtowanie w wykroju zamkniętym.

W czasie pierwszego wariantu procesu (kształtowania półswobodnego) wsad w postaci prostopadłościanu umieszczony jest na matrycy dolnej. Następnie górne narzędzie zaciska środkową część wsadu. Po czym poddawany on jest spęczaniu przez boczne narzędzia, które zbliżają się do siebie w płaszczyźnie poziomej. W ten sposób kształtowane są dwa źebra w otwartych przestrzeniach, ograniczonych powierzchniami narzędzi bocznych oraz narzędziem górnym [21]. Schemat kształtowania półswobodnego odkuwek płaskich z dwoma źebami przedstawiono na rys. 4.20



Rys. 4.20. Schemat kształtowania półswobodnego odkuwek płaskich z dwoma żebrami:
a) początek procesu, b) koniec procesu

W drugim wariantcie kształtowania w wykroju zamkniętym wsad w postaci prostopadłościanu umieszczany jest w wykroju zamkniętym pomiędzy matrycą a narzędziami bocznymi i oporowymi. Następnie środkowa część wsadu zaciskana jest górnym narzędziem. Po czym w wyniku ruchu bocznych narzędzi następuje spęczanie wsadu. Narzędzia te przemieszczają się do siebie w płaszczyźnie poziomej i wyciskają dwa żebra o założonych wymiarach wyrobu w pionową część przestrzeni wykroju zamkniętego, pomiędzy narzędziem górnym, a narzędziami bocznymi i oporowymi [27]. Wariant II procesu umożliwia płynięcie materiału jedynie w kierunku górnym, dzięki czemu kształtuje się znacznie wyższe żebra niż przy zastosowaniu wariantu I. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z dwoma żebrami przedstawiono na rys. 4.21.



Rys. 4.21. Schemat kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z dwoma żebrami:
a) początek procesu, b) koniec procesu

W celu przeprowadzenia analizy teoretycznej kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami w trójsuwakowej prasie kuzniczej wykonano symulacje numeryczne założonych wariantów procesów. Do obliczeń zastosowano program Deform 3D oparty na metodzie elementów skończonych. Badania teoretyczne

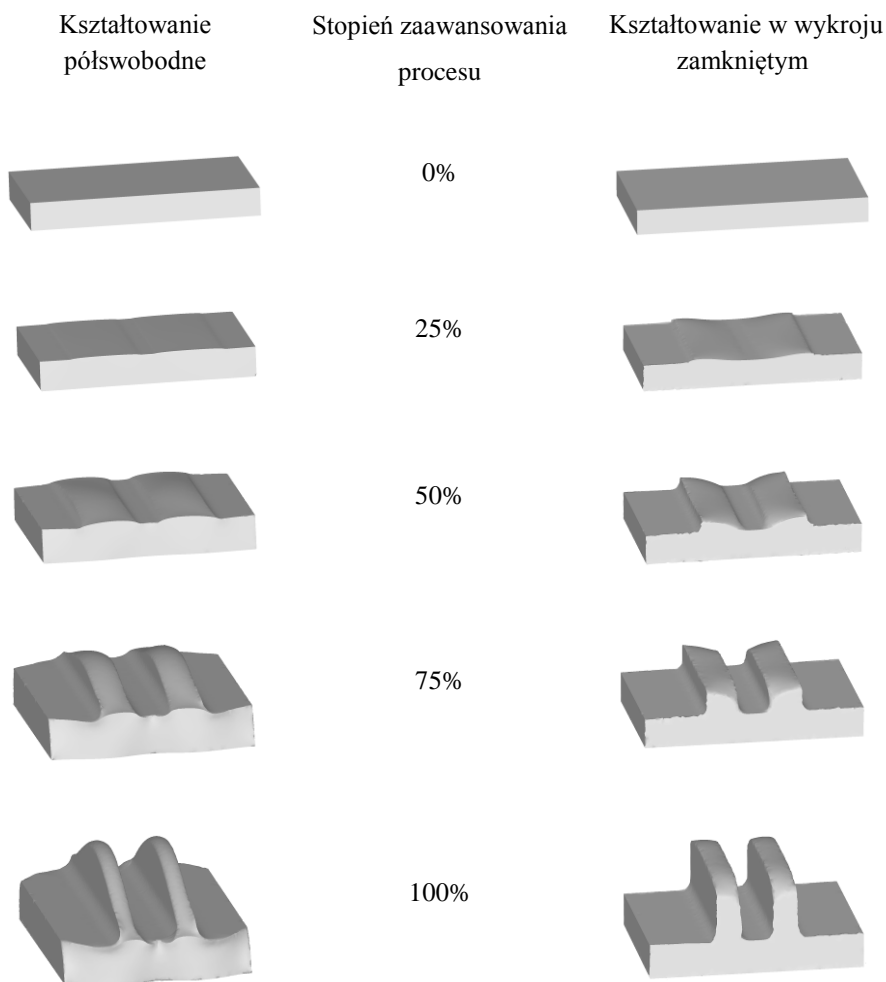
przeprowadzono przy założeniu przestrzennego stanu odkształcenia stosując pełny model termomechaniczny. Warunki tarcia pomiędzy odkształcanym materiałem i narzędziami opisano modelem tarcia stałego. Model materiału MgAl4Zn i AZ31 opracowano na podstawie danych doświadczalnych prezentowanych w rozdziale 3.1. Obliczenia numeryczne wykonano dla następujących warunków procesu:

- wsad w postaci prostopadłościanu o wymiarach: grubość $g_0 = 9,5$ mm, szerokość $s_0 = 50$ mm i długość l_w zmieniana w zakresie 105÷140 mm co 1 mm, zamodelowano przy użyciu 100 tys. tetragonalnych elementów skończonych,
- temperatura nagrzewania wsadu $t_w = 410^\circ\text{C}$ i narzędzi $t_n = 250^\circ\text{C}$,
- długość czynna narzędzi $l_c = 20$ mm,
- prędkość ruchu narzędzi bocznych $v = 6$ mm/s,
- wartość czynnika tarcia przy kształtowaniu bez smarowania dla MgAl4Zn $m = 1$ i AZ31 $m = 0,9$, zaś ze smarowaniem łojem z grafitem dla MgAl4Zn $m = 0,17$ i AZ31 $m = 0,25$ (wartości przyjęte z badań własnych opisanych w rozdziale 3.2),
- współczynnik wymiany ciepła między materiałem kształtowanym a narzędziami przyjęto równy $4,5 \text{ kW/m}^2\text{K}$, zaś między otoczeniem a materiałem $0,03 \text{ kW/m}^2\text{K}$ [84].

Głównym celem przeprowadzenia symulacji było sprawdzenie poprawności przyjętych rozwiązań oraz identyfikacja istotnych parametrów procesu oraz zjawisk zakłócających prawidłowy przebieg kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami w TPK.

4.2.2 Wyniki symulacji numerycznych

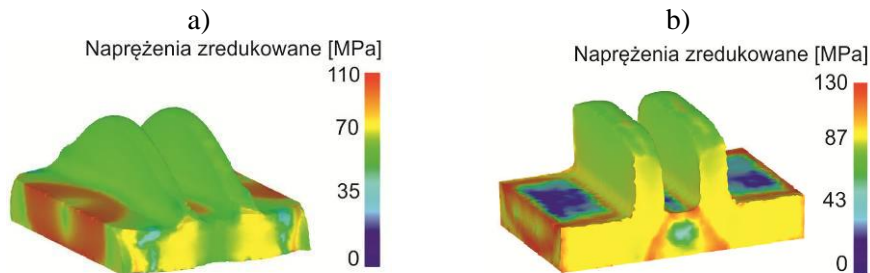
Wyniki obliczeń potwierdziły możliwość kształtowania plastycznego odkuwek płaskich z dwoma żebrami według zaproponowanych technologii. Uzyskano bardzo zbliżone rezultaty dla odkuwek dwuźebrowych ze stopu MgAl4Zn i AZ31. Zauważalne różnice wystąpiły w wartości naprężeń i sił kształtowania. Pozostałe parametry procesu nie wykazywały istotnych różnic. W związku z tym wyniki analizy teoretycznej przedstawiono na przykładzie stopu AZ31, dla którego przeprowadzono kompletne badania doświadczalne dla dwóch wariantów procesu w trójsuwakowej prasie kuzniczej. W efekcie przeprowadzonych symulacji możliwe jest prześledzenie kinematyki płynięcia materiału w poszczególnych etapach procesu (rys. 4.22). Otrzymano także ważniejsze informacje o procesie tj. rozkład naprężeń, odkształceń, temperatur, kryterium zniszczenia C-L oraz przebiegi parametrów siłowych procesów.



Rys. 4. 22 Progresa kształtu odkuwki z dwoma żebrami w procesie kucia półswobodnego i w wykroju zamkniętym

Rozkład naprężeń zredukowanych w ukształtowanych odkuwkach dla dwóch rozpatrywanych wariantów procesu przedstawiono na rys. 4.23. W obu przypadkach rozkład naprężeń jest niejednorodny. W metodzie półswobodnej największe naprężenia można zaobserwować w podstawie odkuwki w miejscach oddziaływania narzędzi bocznych, gdzie maksymalne wartości wynoszą ok. 106 MPa. Mniejsze wartości naprężenia występują na powierzchni czołowej podstawy – ok. 33 MPa oraz na zewnętrznych powierzchniach żeber – ok. 60 MPa. W przypadku kształtowania w wykroju zamkniętym największe naprężenia występują w podstawie

odkuwki na bocznych powierzchniach oraz na g6rnym kraw6dziejach, a tak6e na czołowej powierzchni strefy mi6dzy6ebrowej. W por6wnaniu z poprzedni6 metod6 napr6żenia w tych miejscach przyjmuj6 wy6sze warto6ci r6wne ok. 125 MPa. Ponadto zauwa6alna jest te6 kolejna r6żnica na g6rnej powierzchni podstawy odkuwki uksz6łtowanej w wykroju zamkn6itym, gdzie napr6żenia s6 najmniejsze i wahaj6 si6 w granicach od 6 MPa do 45 MPa.

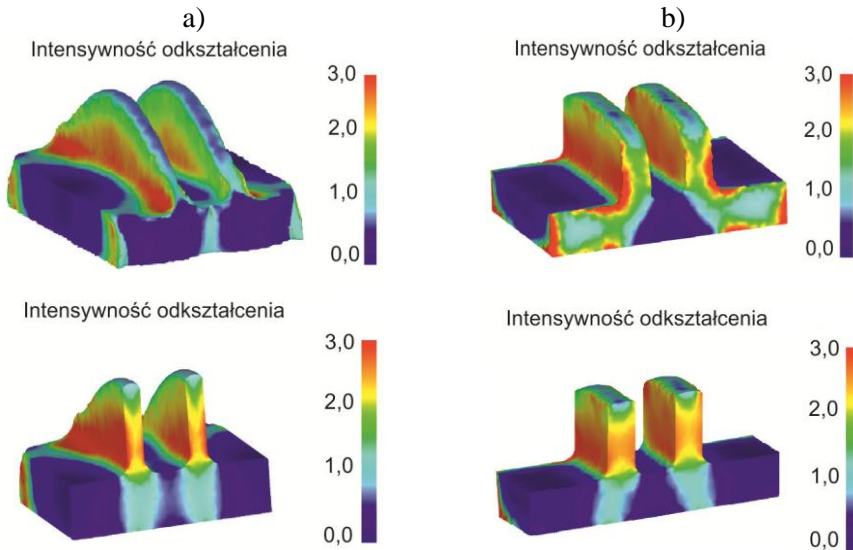


Rys. 4.23. Rozkł6d napr6żeń na powierzchni odkuwek z dwoma 6ebami w ko6cowej fazie kształtowania: a) p6łswobodnego, b) w wykroju zamkn6itym

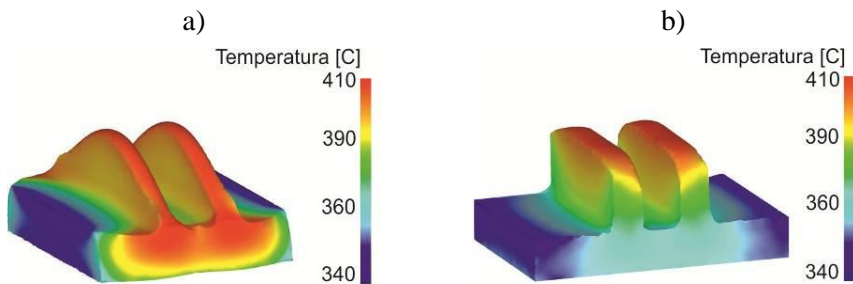
W efekcie wykonanych oblicze6 MES wyznaczono tak6e rozkł6dy intensywno6ci odksz6łce6 w odkuwkach w ko6cowej fazie procesu kształtowania (rys. 4.24). Poni6ej przedstawiono rozkł6dy zar6wno na powierzchni uksz6łtowanych odkuwek, jak i na ich przekrojach poprzecznych. Najwi6ksze warto6ci wyst6puj6 w obszarze 6eber, gdzie materiał jest intensywnie wyciskany pomi6dzy narz6dzia. R6żnice w mapach odksz6łce6 analizowanych odkuwek zaobserwowano na powierzchni czołowej podstawy. Spowodowane jest to tym, 6e w przypadku kształtowania p6łswobodnego nie stosuje si6 dodatkowych narz6dzi ograniczaj6cych mo6liwo66 płyn6cia materiału na boki.

Rozkł6d temperatur jest charakterystyczny i zwi6zany z charakterem odksz6łce6 w kształtowanych odkuwkach. Temperatura w cał6j obj6to6ci odkuwek zawiera si6 w przedziale 340°C do 410°C (rys. 4.25).

Kryterium p6kania wedł6g Cocrofta Lathama zostało om6wione w nast6pnym podrozdziale przy analizie teoretycznej zjawisk ograniczaj6cych proces kształtowania odkuwek z dwoma 6ebami ze stop6w magnezu. W dalszej cz66ci pracy przedstawiono r6wnie6 wyniki oblicze6 dotycz6ce charakterystyki siłowej rozpatrywanych wariant6w procesu, kt6re zestawiono z zarejestrowanymi do6wiadczalnie warto6ciami.



Rys. 4.24. Rozkład intensywności odkształceń w końcowej fazie procesu kształtowania: a) półswobodnego, b) w wykroju zamkniętym



Rys. 4.25. Rozkład temperatur na powierzchni odkuwek z dwoma żebrami w końcowej fazie kształtowania: a) półswobodnego, b) w wykroju zamkniętym

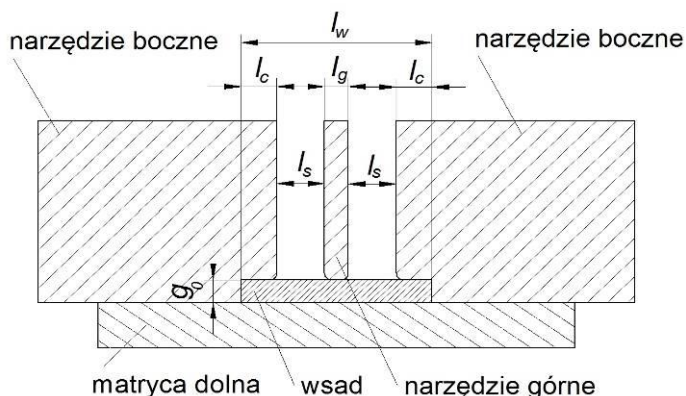
4.2.3 Zjawiska ograniczające proces

Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono, że prawidłowy przebieg procesu kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami ze stopów magnezu może być zakłócony przez następujące zjawiska ograniczające:

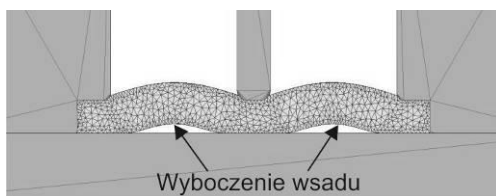
- wyboczenie wsadu,
- zakucia,
- pęknięcia,
- błędy kształtu odkuwki, w tym: poszerzenie podstawy wyrobu, nierównomierność żeber, wypływka czołowa.

Należy nadmienić, że wszystkie wyżej wymienione zjawiska ograniczające odnotowano również przy wcześniej opisanych procesach kształtowania odkuwek z jednym źebrem.

Wystąpienie zjawiska wyboczenia uzależnione jest od współczynnika spęczania k , wyrażonego stosunkiem długości swobodnej l_s kształtowanego wsadu do jego grubości g_0 (rys. 4.26). Wyboczenie pojawia się w momencie kiedy współczynnik k osiąga pewną krytyczną wartość. To czy materiał wsadowy ulegnie wyboczeniu zależy głównie od jego wymiarów. Przy czym im wsad jest dłuższy i cieńszy, tym prawdopodobieństwo wystąpienia wyboczenia jest większe. Schemat powstawania wyboczenia przedstawiono na rys. 4.27. Wcześniejsze doświadczenia związane z wyznaczaniem warunków granicznych współczynnika k dla procesów kształtowania odkuwek z jednym źebrem wykazały, że wyniki teoretyczne w tym zakresie obarczone są błędami. Wyboczenie wsadu w symulacjach numerycznych pojawia się znacznie później niż w rzeczywistym procesie. Założono zatem, że graniczny współczynnik spęczania zostanie wyznaczony w badaniach doświadczalnych.



Rys. 4.26. Wymiary charakterystyczne w procesie kształtowania odkuwki płaskiej z dwoma źebrowaniami w TPK: l_w – długość wsadu, g_0 – grubość wsadu, l_c – długość czynna narzędzi bocznych, l_g – szerokość narzędzia górnego, l_s – długość swobodna spęczanego wsadu ($l_s = l_w - 2l_c - l_g$)

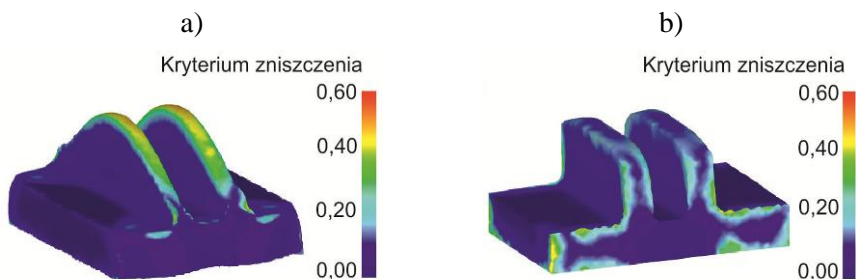


Rys. 4.27. Schemat powstawania wyboczenia w podstawie wyrobu – wyniki MES

Następstwem dużego wyboczenia wsadu jest kolejne zjawisko ograniczające – zakucie w podstawie odkuwki. Wada ta dyskwalifikuje wyrób. Wykorzystany do obliczeń program Deform 3D ma tendencję do przebudowywania siatki

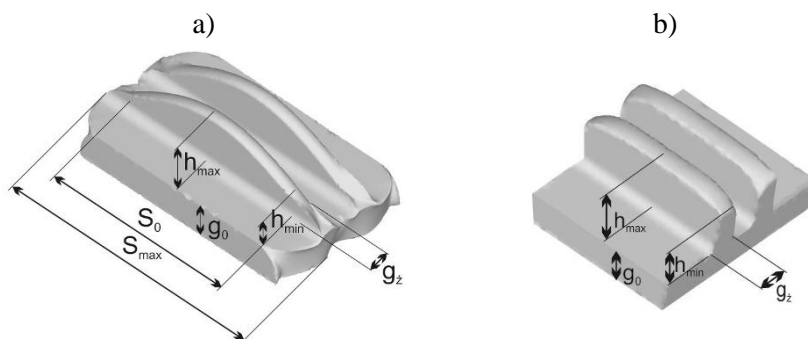
w miejscach powstania tej wady. Materiał w obszarze występowania zakucia zostaje scalony i w efekcie jest ono niewidoczne. W związku z tym diagnozowanie tej wady na podstawie wyników symulacji wymaga prześledzenia całego przebiegu procesu.

Kolejnym ograniczeniem procesu może być pęknięcie. Do oceny niebezpieczeństwa pęknięcia kształtowanych odkuwek wykorzystano zmodyfikowane kryterium energetyczne Cocrofta-Lathama [16] zaimplementowane w programie Deform wyrażone zależnością 4.2. Na rysunku 4.28 przedstawiono rozkład zniszczenia według tego kryterium w odkuwkach kształtowanych metodą półswobodną i w wykroju zamkniętym. Dla obu wariantów procesu największa wartość funkcji (całki) zniszczenia, a więc prawdopodobieństwo wystąpienia pęknięć znajduje się na górnej powierzchni żeber. W tym miejscu materiał szybko się wychładza ze względu na brak kontaktu z podgrzewanymi narzędziami. W przypadku kształtowania w wykroju zamkniętym wyższe wartości całki C-L występują na krawędziach powierzchni czołowej odkuwki, gdzie materiał wciska się pomiędzy narzędzia. Z zamieszczonych rozkładów wynika, że większe niebezpieczeństwo pęknięcia występuje w procesie kształtowania półswobodnego, w którym wartość całki C-L na górnej powierzchni żeber wynosi ok. 0,5.



Rys. 4.28. Rozkład funkcji zniszczenia według Cocrofta-Lathama w ukształtowanych odkuwkach:
a) metodą półswobodną, b) w wykroju zamkniętym

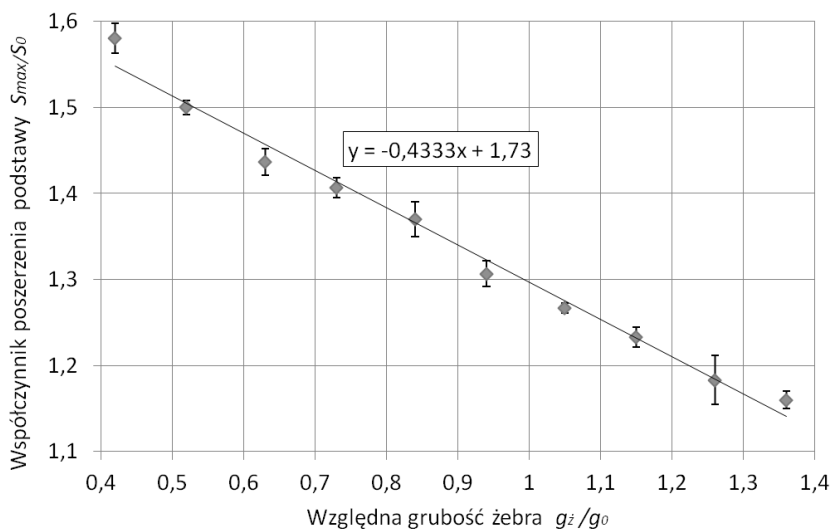
Na podstawie wyników symulacji stwierdzono również występowanie innych niekorzystnych zjawisk związanych z błędami kształtu odkuwki, które zmniejszają efektywność procesu. Zaliczyć można do nich: poszerzenie podstawy odkuwki, nierównomierność kształtu żebra, wypływka czołowa. Są to jednak zniekształcenia odkuwki, które po zastosowaniu dodatkowych operacji obróbki mechanicznej można usunąć. Jednym z tych zjawisk jest poszerzenie podstawy odkuwki pojawiające się tylko przy kształtowaniu półswobodnym (rys. 4.29 a). Powstanie tego naddatku w tym wariantcie procesu wynika z braku narzędzi ograniczających płynięcie materiału na boki. Zniekształcenie to zostało określone za pomocą współczynnika poszerzenia A_s , wyrażonego stosunkiem maksymalnej szerokości podstawy s_{max} do szerokość początkowej wsadu s_0 . Wpływ grubości względnej żebra (g_z/g_0) na współczynnik poszerzenia A_s przedstawiono na rys. 4.30.



Rys. 4. 29. Błędy kształtu odkuwki z dwoma żebrami: a) poszerzenie podstawy i nierównomierność żebra w procesie kucia półswobodnego, b) nierównomierność żebra w procesie kucia w wykroju zamkniętym

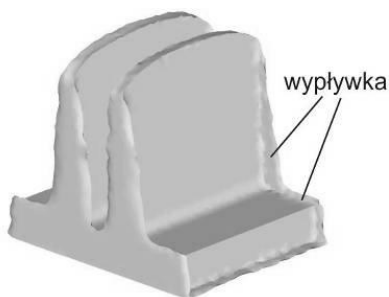
Zgodnie z oczekiwaniami dla odkuwek posiadających dwa żebra istnieje zależność podobna jak przy odkuwkach z jednym żebrzem tj. im mniejsza grubość kształtowanego żebra tym poszerzenie podstawy jest większe. Zależność ta ma charakter w przybliżeniu liniowy. Na podstawie przeprowadzonych symulacji badano również zależność pomiędzy współczynnikiem poszerzenia podstawy A_s a czynnikiem tarcia m dla różnych grubości żeber odkuwki ukształtowanej półswobodnie. Uzyskane relacje są podobne do przypadku kształtowania z jednym żebrzem. Przy kształtowaniu ze smarowaniem poszerzenie podstawy jest nieznacznie większe niż bez użycia smaru.

Następne zniekształcenie odkuwki dotyczy nierównomierności zarysu żeber występującej przy kształtowaniu półswobodnym i w wykroju zamkniętym (rys. 4.29). Określono je za pomocą współczynnika nierównomierności żebra A_h wyrażonego stosunkiem maksymalnej wysokości żebra h_{max} do minimalnej wysokości żebra h_{min} (mierzonej po bokach w płaszczyznach ograniczających szerokość odkuwki do 50 mm). Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono, że dla kształtowania półswobodnego współczynnik nierównomierności zarysu żebra A_h przyjmuje wartość 2,1 bez smarowania oraz 1,8 ze smarowaniem. Dla kształtowania w wykroju zamkniętym $A_h=1,4$ dla warunków bez smarowania i przy użyciu środków smarnych. Analogiczne wartości współczynnika nierównomierności żebra odnotowano przy kształtowaniu odkuwek z jednym żebrzem. Na podstawie otrzymanych rezultatów stwierdzono, że wartość współczynnika A_h jest w przybliżeniu stała i nie zależy od grubości żebra. Analizie poddano również wpływ warunków tarcia na maksymalną wysokość ukształtowanych żeber odkuwki. Na podstawie wyników symulacji stwierdzono, że dla kształtowania półswobodnego lepsze rezultaty (większe h_{max}) osiągnięto bez smarowania. W przypadku drugiego wariantu kształtowania w wykroju zamkniętym stwierdzono, że maksymalna wysokość odkuwki jest niezależna od zmiany warunków tarcia.



Rys. 4.30. Zależność współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości żebra

Kolejnym niepożądanym zniekształceniem odkuwki dwużebrowej jest wypływka czołowa. Jest ona usuwalna, ale wymaga dodatkowych operacji obróbkowych. Na rysunku 4.31 pokazano odkuwkę z wypływką tworzącą się w wyniku przemieszczania się materiału w szczeliny pomiędzy narzędzia.



Rys. 4.31. Wypływka na krawędziach odkuwki dwużebrowej

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA ROZWIĄZAŃ TEORETYCZNYCH

W celu potwierdzenia słuszności opracowanych metod kształtowania odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu i sprawdzenia dokładności wyników symulacji numerycznych tych procesów, przeprowadzono badania doświadczalne. Weryfikację doświadczalną przyjętych rozwiązań teoretycznych wykonano w prototypowej trójsuwakowej prasie kuźniczej w laboratorium Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej w Politechnice Lubelskiej. Prace badawcze prowadzono przy użyciu narzędzi kuźniczych do kształtowania odkuwek uźebrowanych wyposażonych w specjalnie zaprojektowany i wykonany system grzewczy. Podczas wykonywanych prób kucia rejestrowano przebieg siły kształtowania. Otrzymane wyniki z eksperymentu porównano z uzyskanymi z obliczeń MES.

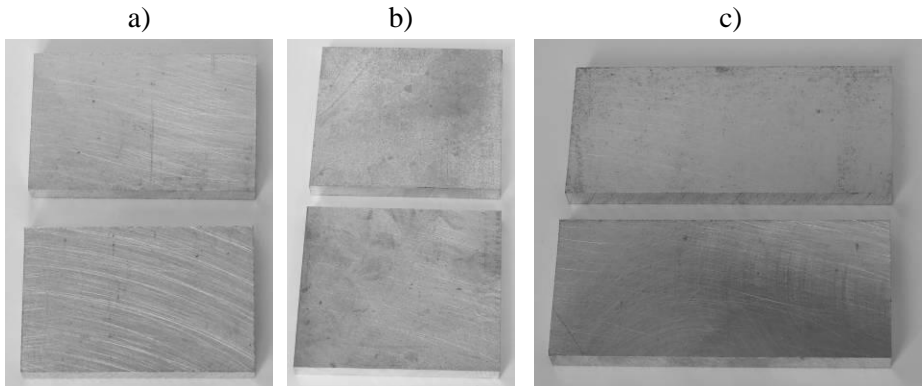
5.1 Metodyka badań

5.1.1 Przygotowanie próbek do badań

Do badań wykorzystano próbki wykonane ze stopu magnezu AZ31 przeznaczonego do przeróbki plastycznej. Stop ten jest powszechnie stosowany w przemyśle lotniczym. Materiałem wyjściowym były płyty o wymiarach $920 \times 920 \times 9,5$ mm otrzymane metodą walcowania, które dostarczono w stanie wyżarzonym. Z materiału tego wycięto próbki do badań o następujących wymiarach:

- szerokości $s_0=50$ mm i długości l_w z przedziału $67 \div 84$ mm (zmienianej co 1 mm) do procesu kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żebrzem,
- szerokości $s_0=92$ mm i długości l_w z zakresu $68 \div 84$ mm (zmienianej co 1 mm) do kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żebrzem o zarysie trójkątnym,
- szerokości $s_0=50$ mm i długości l_w z przedziału $105 \div 140$ mm (zmienianej co 1 mm) do procesu kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z dwoma żebrami.

Przykładowe próbki stosowane podczas eksperymentu pokazano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Fotografia wybranych próbek ze stopu AZ31 wykorzystanych w badaniach doświadczalnych kształtowania odkuwek płaskich: a) z jednym żebrem, b) z jednym żebrem o zarysie trójkątnym, c) z dwoma żebrami

5.1.2 Opis stanowiska badawczego

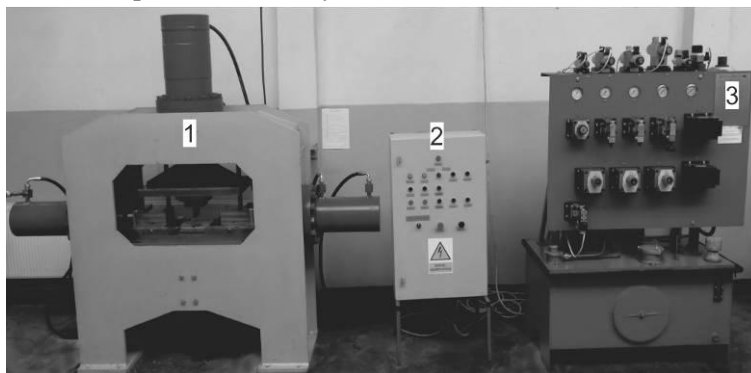
5.1.3 Trójsuwakowa prasa kuźnicza

Badania doświadczalne wykonano w trójsuwakowej prasie kuźniczej (TPK) znajdującej się na wyposażeniu Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej. Na rys. 5.2 przedstawiono wygląd TPK, która składa się z części mechanicznej wyposażonej w zespół narzędziowy pionowy i dwóch identycznych zespołów narzędziowych poziomych, szafy sterowniczej i hydraulicznego układu zasilającego. Budowę zespołu narzędziowego przedstawiono na rys. 5.3. Maszyna ta jest przeznaczona głównie do kształtowania objętościowego odkuwek o złożonych kształtach o maksymalnej długości wsadu 600 mm. Prasa odznacza się trzema ruchomymi suwakami (jednego pionowego i dwóch poziomych) działającymi niezależnie, dzięki którym posiada możliwości technologiczne znacznie przewyższające typowe maszyny kuźnicze. Przykładowe niekonwencjonalne procesy, które można realizować przy użyciu tej maszyny przedstawiono w opracowaniach [31, 35, 36, 37]. Prasa ta charakteryzuje się szeregiem zalet, m.in. [29, 30]:

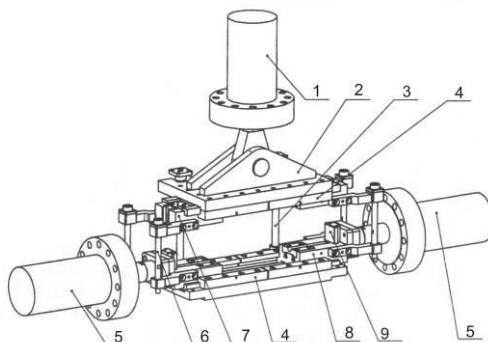
- możliwość wielowariantowej pracy urządzenia przy różnej sekwencji ruchu narzędzi oraz przy zastosowaniu różnych zespołów narzędziowych;
- dokładność prowadzenia suwaka pionowego oraz suwaków poziomych;
- łatwość przebrojenia maszyny;
- łatwość automatyzacji pracy urządzenia.

Podstawowe parametry techniczne prasy są następujące:

- maksymalna siła robocza suwaków poziomych: 0,5 MN;
- maksymalna siła robocza górnego suwaka: 1 MN;
- skok siłowników poziomych: 230 mm;
- skok siłownika pionowego: 200 mm;
- siła działania wyrzutnika: 4kN;
- maksymalna prędkość siłowników: 65mm/sek.;
- płynna regulacja prędkości ruchu siłowników;
- płynna regulacja sił docisku siłowników;
- maksymalny pobór mocy: ok. 25kW;
- układ pomiarowy do monitorowania sił wywieranych przez poszczególne siłowniki oraz przemieszczeń tych siłowników w czasie.

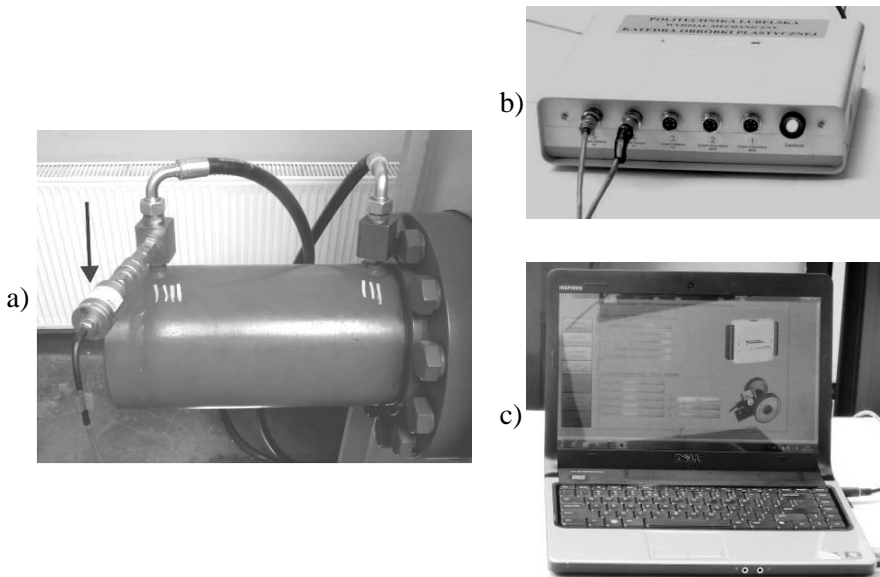


Rys. 5.2. Trójsuwakowa prasa kuznicza: 1 – część mechaniczna prasy, 2 – szafa sterownicza, 3 – hydrauliczny układ zasilający



Rys. 5.3. Zespół narzędziowy trójsuwakowej prasy kuzniczej: 1 – siłownik pionowy, 2 – suwak górny, 3 – słup prowadzący, 4 – prowadnice, 5 – siłowniki poziome, 6 – prowadnica matrycy, 7 – górny zespół narzędziowy, 8 – dolny zespół narzędziowy, 9 – zabierak

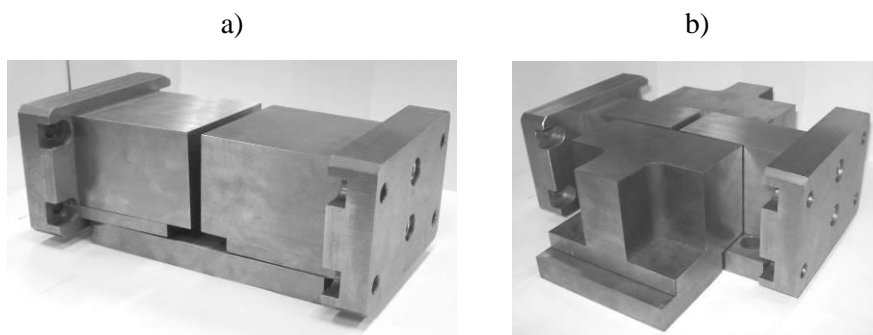
Trójsuwakowa prasa kuźnicza została wyposażona w układ pomiarowy umożliwiający określenie podstawowych parametrów siłowych procesu. W skład układu wchodzi następujące elementy: przystawka pomiarowa wyposażona w kartę pomiarową, zestaw czujników ciśnienia oraz oprogramowanie (rys. 5.4). Pomiar ciśnienia w układzie hydraulicznym rejestrowany jest za pomocą karty pomiarowej sterowanej przez autorski program Fox 1.2. Do badań jeden z siłowników poziomych wyposażono w przetwornik ciśnienia PT-5261H, umieszczony w sposób zgodny z rys. 5.4 a. Umożliwiło to w sposób pośredni wyznaczenie wartości siły w trakcie badanych procesów kształtowania odkuwek z żebrami ze stopów magnezu.



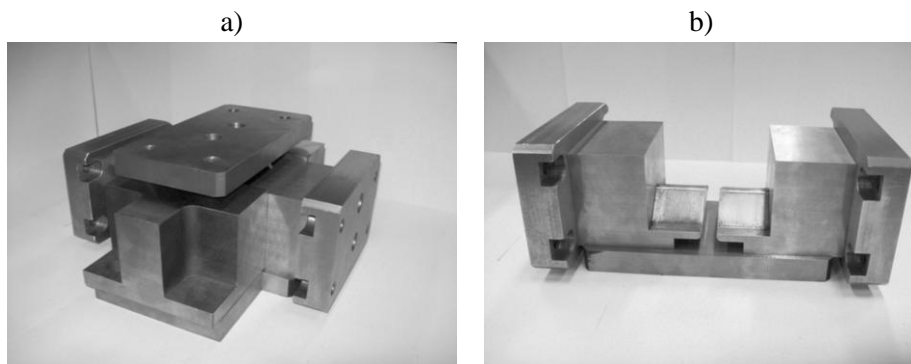
Rys. 5.4. Układ pomiarowy współpracujący z trójsuwakową prasą kuźniczą: a) przetworniki ciśnienia zainstalowane na siłowniku poziomym, b) przystawka pomiarowa, c) system pomiarowy

5.1.4 Zestawy narzędzi kuźniczych użyte do badań

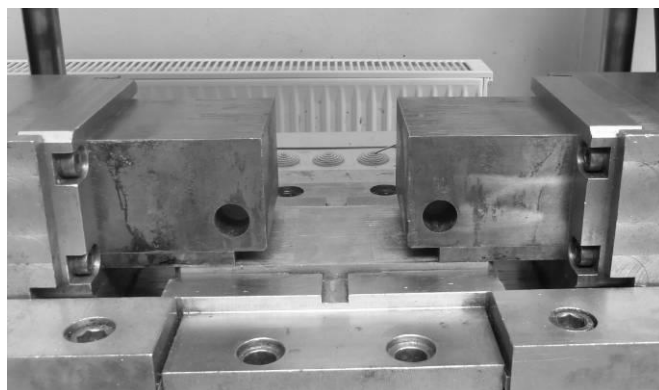
Bazując na kształcie narzędzi użytych do symulacji numerycznych przedstawionych w rozdziale 5.1 i 5.2 zaprojektowano oprzyrządowanie kuźnicze do badań doświadczalnych. Narzędzia wykonano ze stali WCL, a następnie ulepszono cieplnie do twardości 44÷48 HRC. Na rys. 5.5 i 5.6 pokazano fotografię przykładowych narzędzi bezpośrednio po wykonaniu. Po badaniach wstępnych dokonano ich modernizacji w celu umieszczania w nich grzałek patronowych. Na kolejnych rysunkach 5.7÷5.11 przedstawiono zestawy narzędzi po modernizacji dla pięciu badanych wariantów procesów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami, które zamontowano w trójsuwakowej prasie kuźniczej.



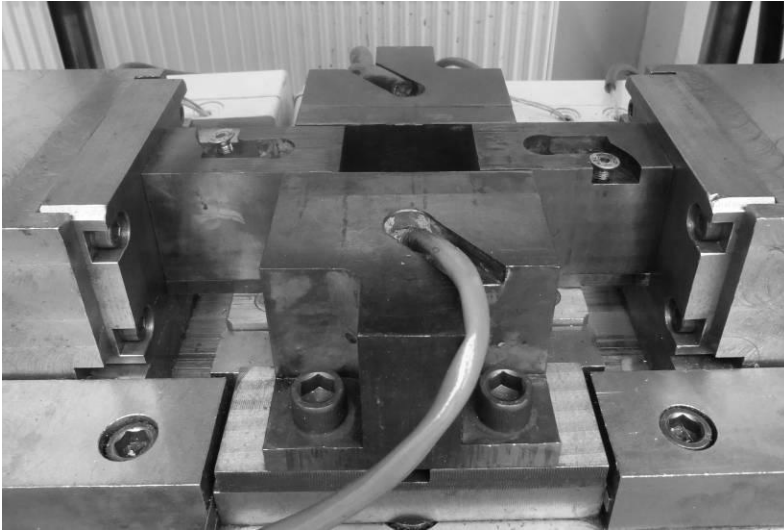
Rys. 5.5. Zestawy narzędzi wykonane do badań procesu kształtowania odkuwek płaskich z jednym źebrem: a) półswobodnie, b) w wykroju zamkniętym



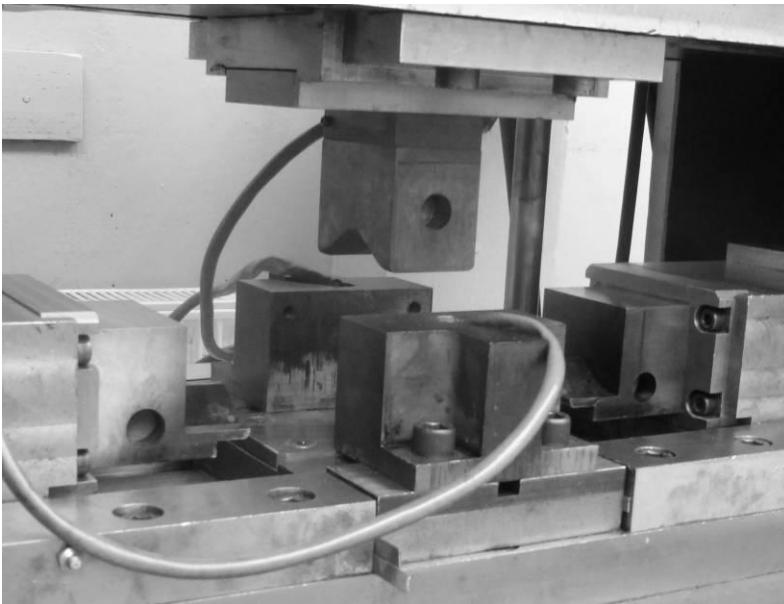
Rys. 5.6. Zestaw narzędzi wykonany do badań kształtowania odkuwek płaskich z jednym źebrem o zarysie trójkątnym: a) złozenie kompletu, b) narzędzia boczne i płyta dolna



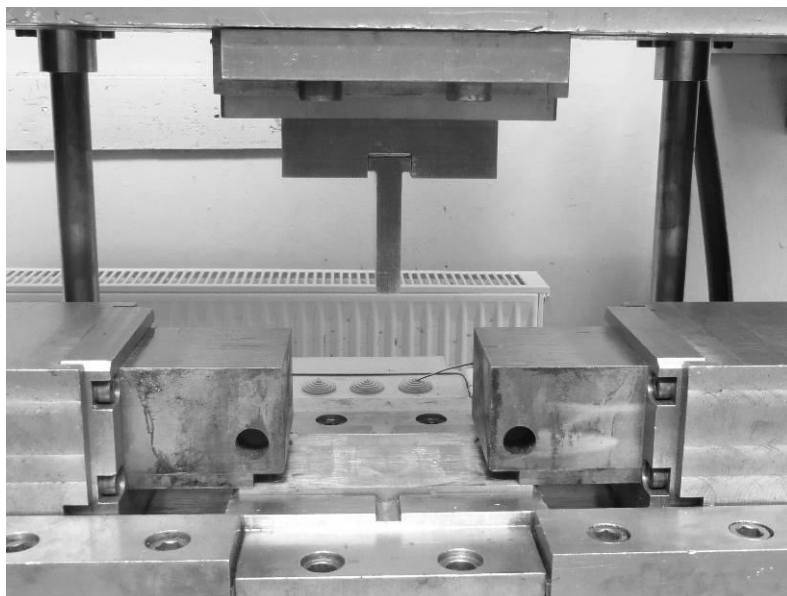
Rys. 5.7. Narzędzia użyte do badań procesu kształtowania półswobodnego odkuwek płaskich z jednym źebrem



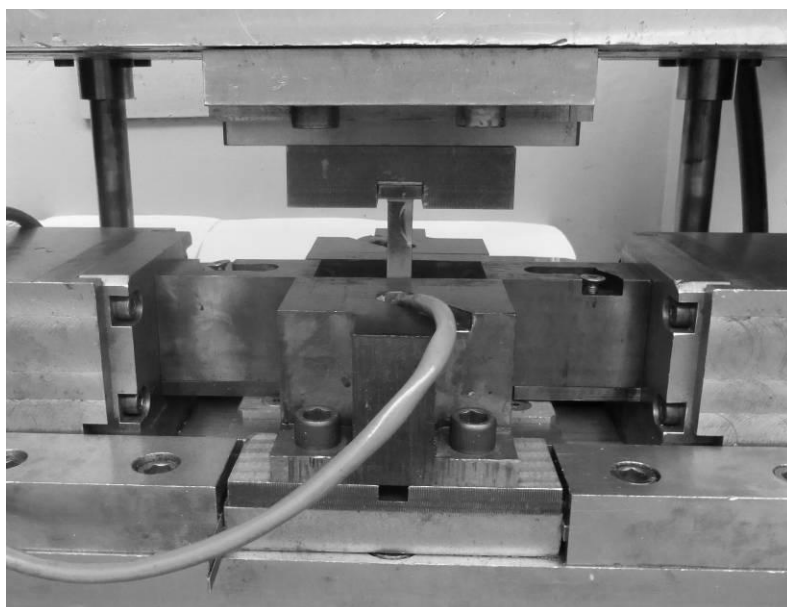
Rys. 5.8. Narzędzia użyte do badań procesu kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żeblem



Rys. 5.9. Narzędzia użyte do badań procesu kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żeblem o zarysie trójkątnym



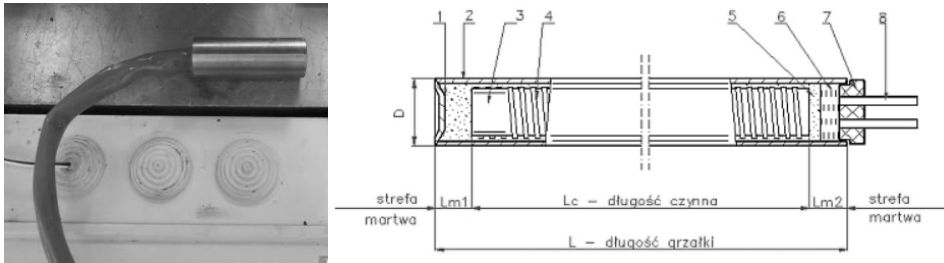
Rys. 5.10. Narzędzia użyte do badań procesu kształtowania półswobodnego odkuwek płaskich z dwoma żebrami



Rys. 5.11. Narzędzia użyte do badań procesu kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z dwoma żebrami

5.1.5 System grzewczy do podgrzewania narzędzi kuźniczych

Do podgrzewania narzędzi w trakcie badań doświadczalnych opracowano specjalny system grzewczy wyposażony w grzałki patronowe z termoparą oraz układ sterujący (rys. 5.12 i 5.13). Grzałki patronowe zasadniczo przeznaczone są do ogrzewania ciał stałych, pracują najczęściej w otworach w częściach metalowych. Mogą być również wykorzystywane także do ogrzewania cieczy oraz gazów. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego gatunku stali grzałki te są odporne na korozję i utlenianie powodowane czynnikami chemicznymi, atmosferycznymi, temperaturą oraz ciśnieniem. Znajdują one zastosowanie głównie w produkcji tworzyw sztucznych, w odlewnictwie, w przemyśle laboratoryjnym itp. W celu zapewnienia odpowiednich warunków temperaturowych procesu grzałki patronowe do badań umieszczono bezpośrednio w narzędziach kuźniczych. Planowaną temperaturę na grzałkach ustawiano za pomocą regulatora znajdującego się w układzie sterującym. Na czas trwania badań doświadczalnych sterowanie systemu grzewczego zostało przymocowane do korpusu trójsuwakowej prasy kuźniczej.



Rys. 5.12. Grzałka patronowa użyta do badań: 1 – denko, 2 – płaszcz metalowy, 3 – rdzeń ceramiczny, 4 – drut oporowy, 5 – materiał izolacyjny, 6 – masa uszczelniająca, 7 – izolator, 8 – wyprowadzenie prądowe [54]



Rys. 5.13. Układ sterujący systemu grzewczego wykorzystany do badań

5.1.6 Zakres badań doświadczalnych

W celu weryfikacji założonych koncepcji kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu przedstawionych w rozdziale 4 wykonano badania doświadczone w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Próby kucia prowadzono dla odkuwek z jednym i z dwoma żebrami przy zachowaniu identycznych warunków jak podano przy analizie teoretycznej procesów tj.:

- wsad nagrzewano do temperatury $t_w=410^{\circ}\text{C}$ w piecu elektrycznym oporowym firmy LAC,
- narzędzia nagrzewano do temperatury $t_n=250^{\circ}\text{C}$ za pomocą grzałek patronowych,
- prędkość ruchu narzędzi kształtujących TPK wynosiła $v=6\text{ mm/s}$,
- kształtowanie realizowano bez smarowania i ze smarowaniem środkiem na bazie łożu z grafitem.

W trakcie badań temperaturę narzędzi i kształtowanej odkuwki monitorowano przy pomocy kamery termowizyjnej firmy FLIR.

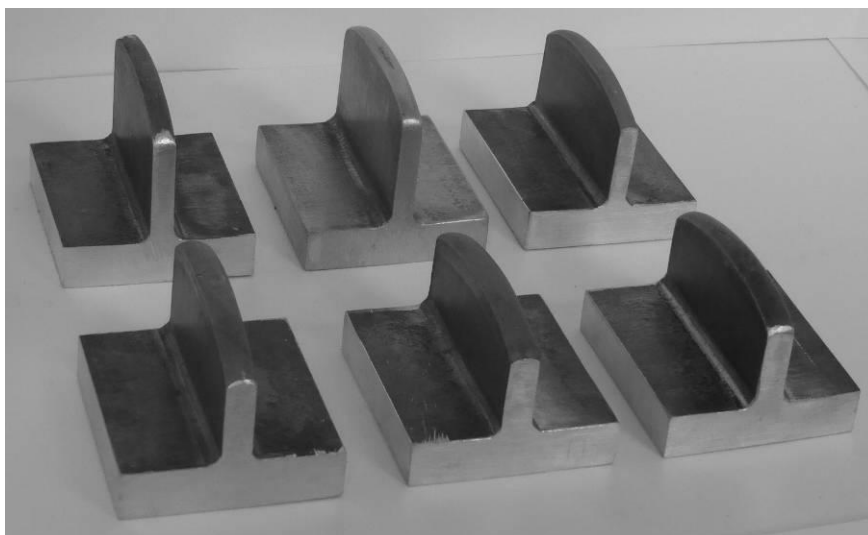
Głównym celem przeprowadzenia eksperymentu było sprawdzenie poprawności opracowanych teoretycznie nowych sposobów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych w trójsuwakowej prasie kuźniczej. W badaniach doświadczalnych planowano również wyznaczyć graniczną wartość współczynnika spęczania płyty k . Znajomość optymalnej wartości tego parametru zapewni prawidłowy przebieg procesu i uzyskanie wyrobów pozbawionych wad. Graniczne wartości współczynnika k (spęczania płyty) oraz długości swobodnej wsadu l_s (potrzebnej do uzyskania prawidłowej odkuwki, rys. 4.2 i 4.26) wyznaczano metodą prób i błędów zwiększając długość wsadu l_s oraz współczynnik k , aż do uzyskania wyrobów wadliwych. Największe wartości l_s i k , przy których wykonano odkuwki prawidłowe uznano za wartości graniczne. Dla najlepszych warunków kształtowania wykonano serię prawidłowych wyrobów (minimum po trzy odkuwki bez wad). Podczas prób doświadczalnych dokonano także pomiaru ciśnienia w układzie hydraulicznym, na podstawie którego obliczono siłę kształtowania. Pomiaru wykonywano minimum trzykrotnie dla każdego optymalnego przypadku.

5.2 Wyniki badań doświadczalnych procesów kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem

W efekcie wykonanych prac badawczych potwierdzono prawidłowość opracowanych koncepcji kształtowania odkuwek płaskich z jednym żebrzem ze stopu magnezu AZ31 w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Podobne rezultaty otrzymano dla odkuwek ze stopu MgAl4Zn. Na rysunkach 5.14÷5.16 przedstawiono prawidłowe odkuwki uzyskane z eksperymentu. Uzyskano zbliżony kształt odkuwek z badań doświadczalnych i z symulacji MES, co wskazuje ich porównanie przedstawione na rys. 5.17.



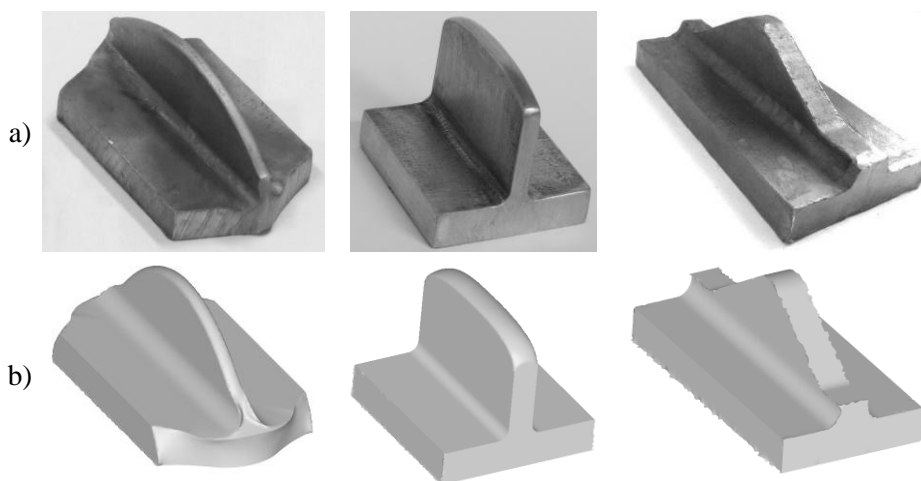
Rys. 5.14. Odkuwki z jednym żebrem ze stopu AZ31 uzyskane w procesie kształtowania półswobodnego w TPK



Rys. 5.15. Odkuwki z jednym żebrem ze stopu AZ31 uzyskane w procesie kształtowania w wykroju zamkniętym w TPK



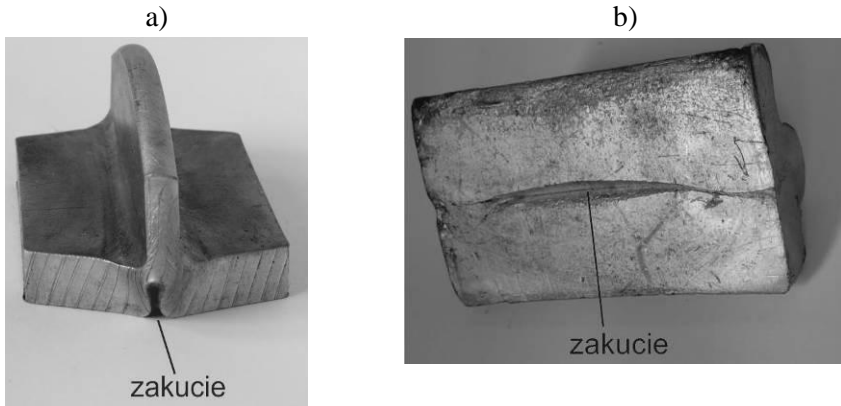
Rys. 5.16. Odkuwki z jednym źebrem o zarysie trójkątym ze stopu AZ31 uzyskane w procesie kształtowania w wykroju zamkniętym w TPK



Rys. 5.17. Porównanie kształtu odkuwki z jednym źebrem ze stopu AZ31 uzyskanej na drodze: a) badań doświadczalnych, b) symulacji MES

Badania doświadczone potwierdziły rezultaty analizy MES w zakresie wystąpienia zjawisk ograniczających proces. W trakcie eksperymentu zaobserwowano: wyboczenie wsadu, zakucie oraz błędy kształtu odkuwki. Podczas prób doświadczalnych wyznaczono graniczną wartość współczynnika k dla trzech badanych wariantów procesu. Przy kształtowaniu półswobodnym i w wykroju zamkniętym wartość graniczna współczynnika spęczenia wyniosła $k_{gr}=3,57$. Po przekroczeniu tej wartości powstawały odkuwki wadliwe z wyboczeniem,

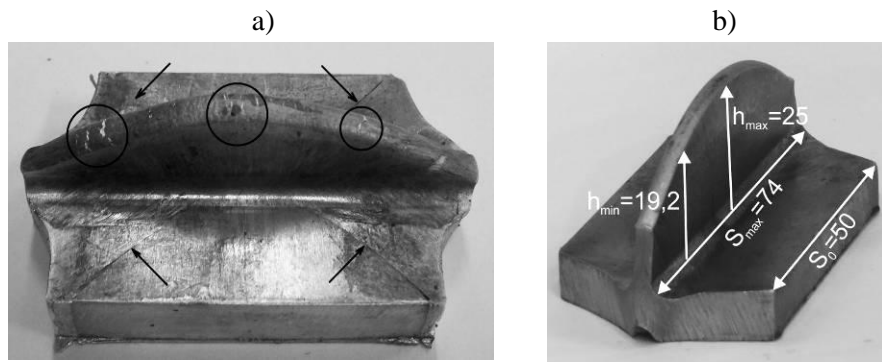
a następnie zakuciem w podstawie wyrobu (rys. 5.18 a). Takie zjawisko wystąpiło dla długości swobodnej $l_s \geq 34$ mm. W przypadku procesu kształtowania w wykroju zamkniętym odkuwki płaskiej z żebrami o zarysie trójkątnym w wykroju zamkniętym prawidłowy wyrób można uzyskać dla współczynnika spęczania $k \leq 3,36$ (długość swobodnej $l_s = 32$ mm). Realizacja procesu dla długości swobodnej większej niż 32 mm prowadzi do uzyskania odkuwki wadliwej posiadającej zakucie w podstawie wyrobu (rys. 5.18 b). Wymienione powyżej ograniczenia w postaci wybożenia i zakucia występujące w procesie kształtowania odkówek z jednym żebrami decydują o dyskwalifikacji wyrobu.



Rys. 5.18. Zakucie w podstawie odkuwki ze stopu AZ31 kształtowanej: a) półswobodnie, b) w wykroju z żebrami o zarysie trójkątnym

Kolejną wadą nieusuwalną, która wystąpiła w trakcie badań nad kształtowaniem odkówek z jednym żebrami ze stopów magnezu, jest pęknięcie. Pierwsze próby kucia półswobodnego prowadzone z grzaniem narzędzi przy pomocy palnika gazowego wykazały, że kształtowany materiał ulegał pękaniu. Zjawisko to wystąpiło zarówno dla stopu AZ31 jak i dla MgAl4Zn. Pęknięcia pojawiły się na górnej krawędzi kształtowanego żebra (lokalizacja zgodna z wynikami analizy teoretycznej) oraz w podstawie odkuwki (rys. 5.19 a). Linie pęknięcia w podstawie położone są pod kątem 45° do kierunku przyłożonych obustronnie sił kształtowania, a więc pokrywają się z kierunkiem maksymalnych naprężeń stycznych. Za główną przyczynę powstawania pęknięć w podstawie uznano nieodpowiednie warunki temperaturowe procesu. Materiał ulegał szybkiemu ochłodzeniu wskutek wymiany ciepła z narzędziami nagrzanymi do temperatury ok. 100°C . Konsekwencją spadku temperatury była utrata plastyczności i pomimo, że podstawa odkuwki prawie nie podlegała odkształceniom, występujący w procesie stan naprężeń powodował pęknięcie. W związku z powyższym podniesiono temperaturę narzędzi do ok. 250°C przy pomocy opracowanego autorskiego systemu grzewczego z grzałkami patronowymi i próby kształtowania wykonano ponownie. Okazało się, że warunki kształtowania znacząco

się poprawiły i w efekcie uzyskano odkuwki bez pęknięć podstawy. Wyższa temperatura narzędzi wpłynęła również na poprawę warunków kształtowania w obszarze żebra, w którym również nie stwierdzono pęknięć.



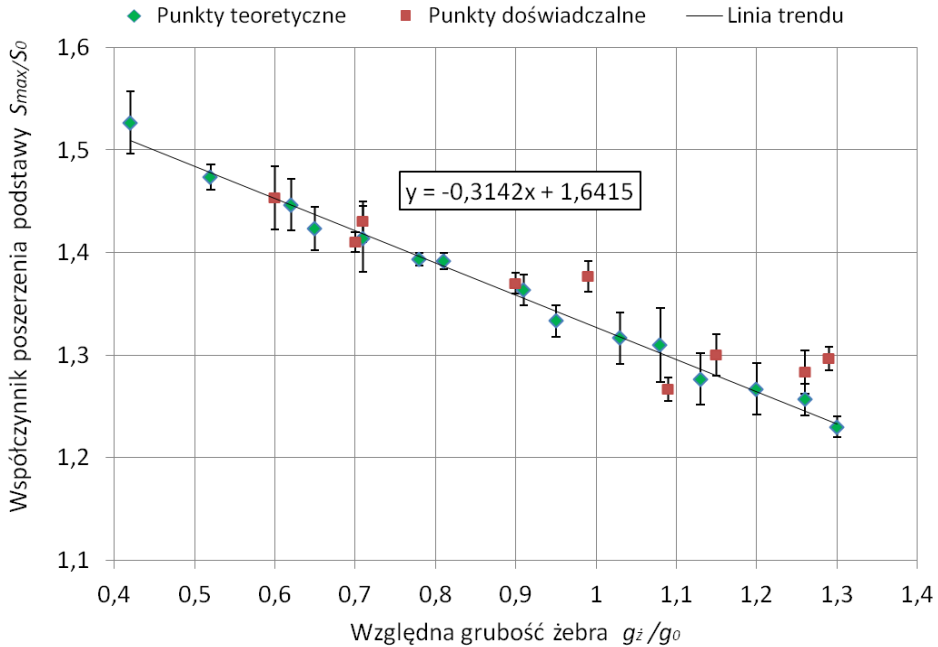
Rys. 5.19. Zjawiska ograniczające proces kształtowania wyrobu płaskiego z jednym żebrzem ze stopu: a) pęknięcia odkuwki ze stopu MgAl4Zn, b) poszerzenie podstawy i nierównomierność żebra odkuwki ze stopu AZ31

Badania doświadczalne potwierdziły występowanie innych niekorzystnych zjawisk związanych z błędami kształtu odkuwki takich jak: poszerzenie podstawy, nierównomierność żebra, wypływka czołowa, niewypełnienie wykroju.

Odkuwka ukształtowana półswobodnie w warunkach rzeczywistych charakteryzuje się również poszerzeniem podstawy (rys. 5.19 b). Na rysunku 5.20 przedstawiającym zależność współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości żebra naniesiono punkty odpowiadające pomiarom doświadczalnym. Dane z eksperymentu wykazują zgodność z wynikami obliczeń. Nierównomierność podstawy jest zjawiskiem niekorzystnym ponieważ zwiększa naddatek materiału, który należy usunąć w celu uzyskania odkuwki o podstawie prostokątnej. Przykładowo dla zastosowanych warunków badań, dla odkuwek o grubości żebra $g_z < 8$ mm nadatek ten przekracza 25%. Ponadto im większa nierównomierność podstawy, tym mniejszą wysokość żebra można uzyskać, a więc spada efektywność procesu.

Kolejnym zniekształceniem odkuwek odnotowanym w badaniach doświadczalnych była nierównomierność zarysu żebra. Charakterystyczną cechą geometryczną odkuwek ukształtowanych półswobodnie jest nierównomierność kształtu żebra, które posiada zarys półokrągły (rys. 5.19 b). Niezależnie od grubości żebra wartość współczynnika nierównomierności A_h wynosi ok. 1,3 dla kształtowania bez smarowania oraz 1,25 ze smarowaniem. Przy czym nierównomierność obliczona w oparciu o MES była większa i wynosiła odpowiednio 2,1 dla warunków kształtowania bez smaru i 1,8 z użyciem środka smarnego. Różnice te wynikają z wyidealizowanych warunków symulacji oraz podziału wsadu na elementy dużo większe niż cząstki materiału rzeczywistego. Wielkość oraz ilość

tych elementów determinuje kształt otrzymanej odkuwki z obliczeń MES. Uzyskanie większych dokładności wiąże się z podziałem objętości odkuwki na elementy dużo mniejsze, co znacznie wpływa na wydłużenie czasu obliczeń.



Rys. 5.20. Porównanie wyników doświadczalnych z otrzymanymi z symulacji MES w zakresie zależności współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości żebra odkuwki z jednym żebrem ze stopu AZ31 ukształtowanej półswobodnie

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono fakt, że najwyższe żebra przy kuciu półswobodnym można uzyskać realizując proces bez smarowania (tab. 5.1). Odkuwki ukształtowane przy użyciu środków smarnych charakteryzują się nieznacznie mniejszą nierównomiernością zarysu żebra oraz większym poszerzeniem podstawy.

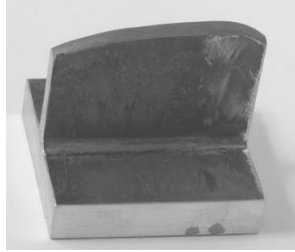
W przypadku kucia w wykroju zamkniętym nierównomierność żebra otrzymanych wyrobów jest mniejsza niż przy kształtowaniu półswobodnym. Średni współczynnik nierównomierności żebra wynosi $A_n=1,2$ dla warunków bez smarowania i z użyciem środka smarnego i nie zależy od grubości żebra. Wyniki doświadczalne w tym zakresie są zbliżone z rezultatami obliczeń dla których wartość współczynnika nierównomierności osiągnęła wartość 1,4 dla różnych warunków tarcia.

Tab. 5.1. Porównanie wybranych odkuwek z jednym źebrem ukształtowanych półswobodnie bez smarowania i przy uźyciu środków smarnych

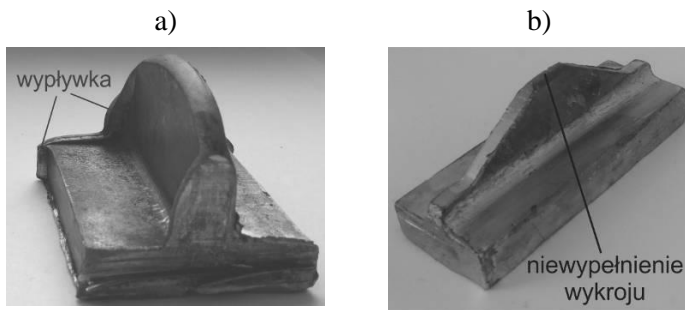
Warunki tarcia	Maksymalna szerokość podstawy S_{max} [mm]	Grubość źebra g_z [mm]	Maksymalna wysokość źebra h_{max} [mm]	Wysokość minimalna źebra h_{min} [mm]
Bez smarowania	76	3	28	21,5
	74	4	27,4	21,2
	73,4	5	25,8	19,8
	72,5	6	24,6	18,9
	70,5	7	23,4	18
	69,3	8	21	16
	68,5	9	18	13,9
	63	10	15	11,6
Ze smarowaniem	77	3	27	21,6
	75,2	4	26,1	20,7
	74,1	5	24,3	19,4
	73,5	6	23	18,5
	71	7	22,2	17,76
	70,4	8	19,8	15,96
	69	9	17,2	13,76
	65	10	12,9	10,32

W trakcie procesu mogą pojawiać się przypadkowe zjawiska, które spowodowały znaczną nierównomierność zarysu źebra. Taki przykład odkuwki przedstawiono na rys. 5.21, którą otrzymano w trakcie realizacji badań ze smarowaniem. Przyczyną tej wady jest nierównomierne płynięcie materiału podczas kształtowania. W miejscach dobrego smarowania narzędzi materiał przemieszczał się intensywniej niż w obszarach z niewielką lub szczątkową

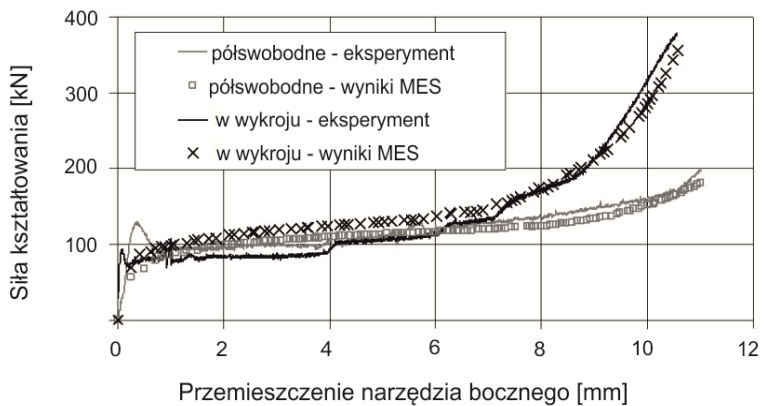
ilością smaru. Istnieją jeszcze inne zjawiska ograniczające proces zaobserwowane wśród wyrobów otrzymanych z eksperymentu, które związane są z błędami kształtu odkuwki takie jak: wypływka czołowa (usuwalna wada) i niewypełnienie wykroju (dyskwalifikujące wyrób) (rys. 5.22).



Rys. 5.21. Nierównomierność zarysu żebra odkuwki ukształtowanej w wykroju zamkniętym

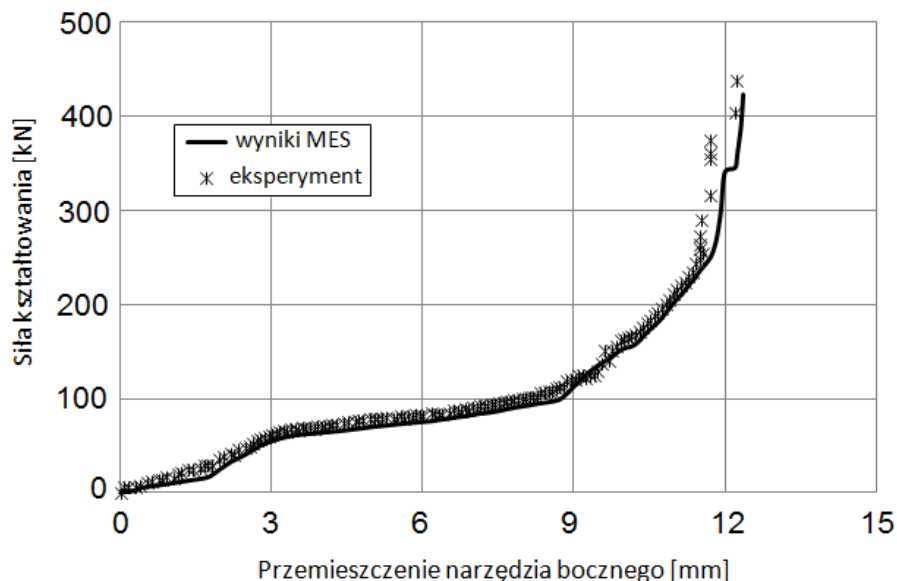


Rys. 5.22. Odkuwki z błędami kształtu uzyskane doświadczalnie: a) wypływka na powierzchni czołowej, b) niewypełnienie wykroju



Rys. 5.23. Przebieg sił kształtowania w procesie kucia półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwki płaskiej z jednym żebrem ze stopu AZ31

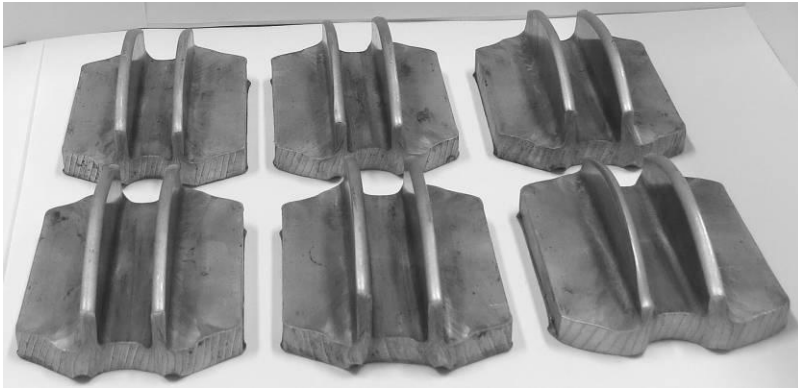
Dla dwóch wariantów procesu przebieg sił kształtowania w funkcji drogi narzędzia bocznego przedstawiono na rys. 5.23. Rozkład siły przy kuciu półswobodnym i w wykroju zamkniętym jest typowy dla procesów spęczania. W miarę zmniejszania się grubości zębra siła kształtowania rośnie. Porównanie jakościowe i ilościowe siły teoretycznej i doświadczalnej wykazuje dobrą zgodność wyników. Świadczy to o dobrej jakości modelu teoretycznego w zakresie parametrów siłowych. Porównując oba warianty procesu należy stwierdzić, że w celu uzyskania odkuwki z taką samą grubością zębra kształtowanie w wykroju zamkniętym wymaga użycia większej siły. Zarejestrowany przebieg siły kształtowania dla trzeciego wariantu procesu kucia odkuwek z zębem o zarysie trójkątnym przedstawiono na rys. 5.24. Rozkład siły jest typowy dla procesów kucia bezwypływkowego. W początkowej fazie jej wartość jest stosunkowo mała. Natomiast pod koniec procesu siła gwałtownie wzrasta. Związane jest to z wypełnianiem przez materiał górnego obszaru wykroju zębra.



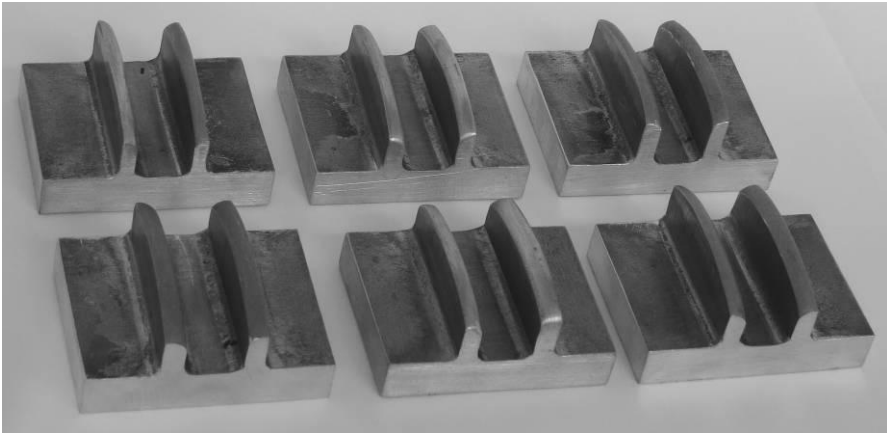
Rys. 5.24. Przebieg siły kształtowania w procesie kucia odkuwki płaskiej z zębem o zarysie trójkątnym ze stopu AZ31

5.3 Wyniki badań doświadczalnych procesów kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami

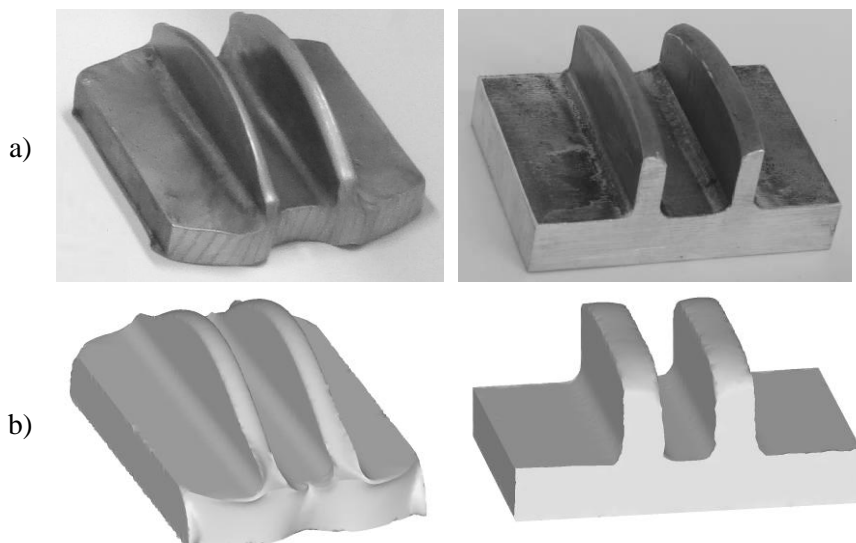
Uzyskane wyniki badań doświadczalnych potwierdziły poprawność zamodelowanych procesów kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami ze stopów magnezu w trójsuwakowej prasie kuźniczej opisanych w rozdziale 4. Przykładowe wyroby odkute w trakcie prób pokazano na rys. 5.25 i 5.26. Ich kształt jest zbliżony do odkuwek modelowych otrzymanych w symulacjach numerycznych (rys. 5.27).



Rys. 5.25. Odkuwki z dwoma żebrami ze stopu AZ31 uzyskane w procesie kształtowania półswobodnego w TPK



Rys. 5.26. Odkuwki z dwoma żebrami ze stopu AZ31 uzyskane w procesie kształtowania w wykroju zamkniętym w TPK



Rys. 5.27. Porównanie kształtu odkuwki z dwoma żebrami ze stopu AZ31 uzyskanej na drodze:
a) badań doświadczalnych, b) symulacji MES

Jednym z głównych parametrów technologicznych badanych procesów jest dopuszczalny współczynnik spęczenia. Na podstawie badań stwierdzono, że dla dwóch rozpatrywanych wariantów procesu prawidłowe odkuwki dwużebrowe ze stopu AZ31 można uzyskać dla współczynnika spęczenia $k \leq 3,1$ przy długości swobodnej $l_s = 29,5$ mm. Przy stosowaniu większych współczynników spęczenia ($k > 3,1$) proces kucia zostaje zaburzony przez zjawisko wyboczenia. Przy dalszym jego kształtowaniu materiał załamuje się i powstaje zakucie (rys. 5.28 a).



Rys. 5.28. Przykładowe odkuwki dwużebrowe z zakuciem w podstawie (a) oraz z pęknięciami i nierównomiernością wysokości i grubości żeber (b)

Ograniczeniem procesu kształtowania odkuwek dwużebrowych ze stopu AZ31 jest również występowanie pęknięć. Przykładowe odkuwki ukształtowane półswobodne z pęknięciami pokazano na rys. 6.28 b. Lokalizacja występujących pęknięć, które pojawiły się na górnej powierzchni żebra i czołowej powierzchni podstawy odkuwki jest zgodna z wynikami symulacji. Efekt ten jest związany z szybkim ochłodzeniem materiału w miejscach nieograniczonych narzędziami. Zmniejszenie niebezpieczeństwa powstawania pęknięć można osiągnąć poprzez zastosowanie kształtowania w warunkach izotermicznych. Należy nadmienić, że istnieją jeszcze inne zjawiska ograniczające proces związane z deformacją kształtu odkuwki takie jak: poszerzenie podstawy, nierównomierność żeber, czy wypływka czołowa. Te ograniczenia mają jednak mniejsze znaczenie, gdyż stosując dodatkowe operacje obróbkowe można je wyeliminować.

W procesie kształtowania półswobodnego w warunkach laboratoryjnych wystąpiły zniekształcenia odkuwki w postaci poszerzenia podstawy i nierównomierności kształtu żebra. Te ograniczenia zwiększają materiałochłonność procesu i ograniczają go do stosowania tylko do odpowiedniej grupy wyrobów z żebrami o zarysie półokrągłym lub trójkątnym. Na rys. 5.29 przedstawiono porównanie wyników doświadczalnych z otrzymanymi z symulacji MES w zakresie zależności współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości żebra. Z danych zamieszczonych na wykresie wynika, że uzyskano zadowalającą zgodność pomiędzy eksperymentem i teorią. Natomiast wyniki doświadczenia dotyczące nierównomierności zarysu żebra w odkuwkach kształtowanych półswobodnie nie są zbieżne z rezultatami obliczeń. Wartość doświadczalna współczynnika nierównomierności A_h wynosi 1,34 bez smarowania i 1,28 ze smarowaniem, zaś teoretyczna osiągnęła wynik 2,1. Przyczyna odnotowanej różnicy jest identyczna jak w przypadku odkuwek kształtowanych półswobodnie z jednym żebrzem i została omówiona w rozdziale 5.2. Najbardziej korzystne warunki do kształtowania półswobodnego w warunkach doświadczalnych osiągnięto bez użycia środków smarnych. Realizacja procesu bez smarowania zapewniła otrzymanie odkuwek z wyższymi żebrami (tab. 5.2).

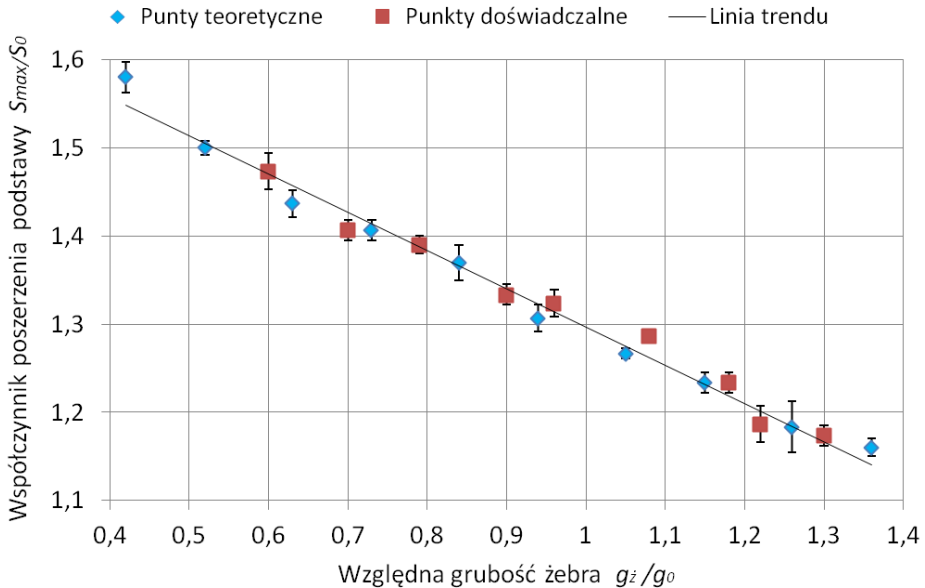
Przy kształtowaniu ze smarowaniem odnotowano nieznacznie mniejszą nierównomierność zarysu żebra i większe poszerzenie podstawy. W trakcie procesu mogą pojawiać się przypadkowe zjawiska powodujące znaczną nierównomierność wysokości, grubości i zarysu żebra. Takie przykłady z jednym wyższym i cieńszym żebrzem oraz drugim niższym i grubszy żebrzem odkuwki przedstawiono na rys. 5.28 b. Przyczyną tej wady jest niewłaściwe ułożenie wsadu w wykoju narzędzi.

Tab. 5.2. Porównanie wybranych odkuwek z dwoma źebami ukształtowanymi półswobodnie bez smarowania i przy użyciu środków smarnych

Warunki tarcia	Maksymalna szerokość podstawy S_{max} [mm]	Grubość źeber g_z [mm]	Maksymalna wysokość źeber h_{max} [mm]	Wysokość minimalna źeber h_{min} [mm]
bez smarowania	76,2	3	27,6	20,5
	75,8	4	25,8	19,1
	75,2	5	24,9	18,5
	74,5	6	23,2	17,1
	71	7	22	16,4
	69,5	8	18	13,5
	66,5	9	17,1	12,7
	64	10	14,9	11
ze smarowaniem	77,1	3	26,8	20,9
	76,3	4	24,2	18,9
	76	5	23,1	17,9
	75,6	6	22,3	17,4
	72,1	7	21,3	16,5
	70,5	8	17,2	13,5
	68	9	16	12,5
	65,7	10	13,4	10,5

Kształtowanie w ramach eksperymentu według drugiego wariantu procesu tj. w wykroju zamkniętym pozwoliło wykonać odkuwki o podstawie prostokątnej o szerokości równej szerokości wsadu. Jednakże w tym przypadku również wystąpiło zniekształcenie w postaci nierównomierności kształtu źebra, która jest zdecydowanie mniejsza od kształtowania półswobodnego i wynosi

ok. 1,38 ze smarowaniem i bez użycia środków smarnych (bardzo zbliżona do wyników MES, gdzie $A_n=1,4$). Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że zmiana warunków tarcia przy tym wariancie procesu nie wpływa znacząco na wysokość i nierównomierność zarysu zębra.



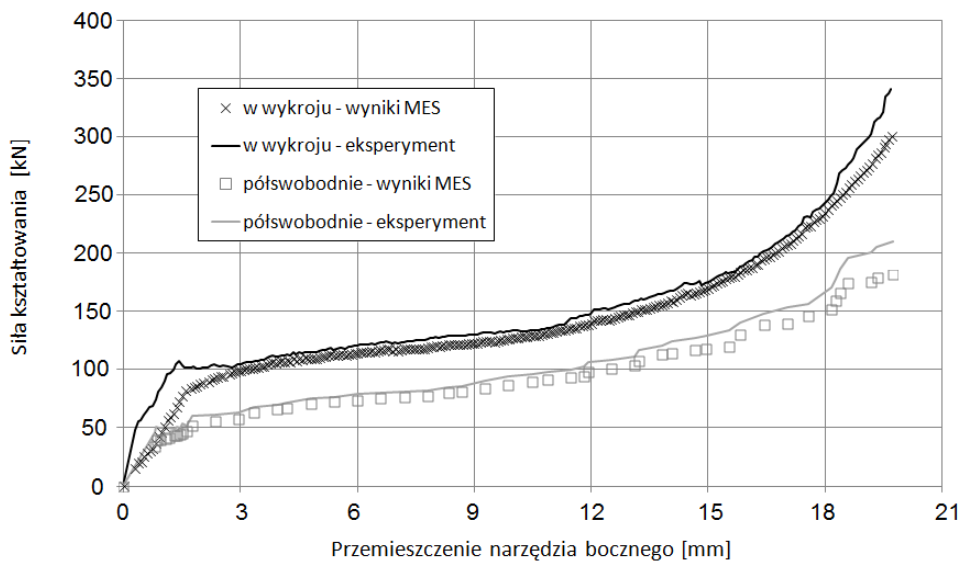
Rys. 5.29. Porównanie wyników doświadczalnych z otrzymanymi z symulacji MES w zakresie zależności współczynnika poszerzenia podstawy od względnej grubości zębra odkuwki z dwoma zębami ze stopu AZ31 ukształtowanej półswobodnie

Kolejnym ograniczeniem, które wystąpiło w trakcie prób kucia odkuwek dwuzębrowych było tworzenie się wypływkii czołowej (rys. 5.30). Przyczyną może być powstający luz pomiędzy współpracującymi narzędziami, pod które materiał się wciska w trakcie kształtowania odkuwki. Zastosowanie odpowiednio dobranej obróbki mechanicznej pozwoli nadać pożądany kształt wyrobu.



Rys. 5.30. Wypływkii na powierzchniach czołowych odkuwki z dwoma zębami

W trakcie badań laboratoryjnych określono siłę potrzebną do kształtowania odkuwek płaskich z dwoma żebrami ze stopu AZ31 dla dwóch założonych wariantów procesu. Porównanie sił zmierzonych doświadczalnie i obliczonych MES pokazano na rys. 5.31. Analizując rozkłady sił zauważono zbliżone wyniki jakościowe i ilościowe.



Rys. 5.31. Rozkłady sił kształtowania odkuwek z dwoma żebrami ze stopu AZ31 zmierzone doświadczalnie i obliczone MES

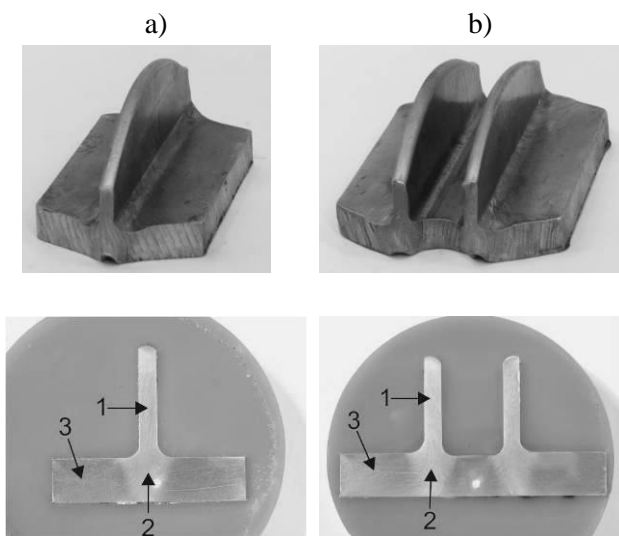
6. BADANIA JAKOŚCIOWE UKSZTAŁTOWANYCH ODKUWEK Z ŻEBRAMI ZE STOPÓW MAGNEZU

Wyroby wytwarzane w oparciu o nowo opracowane technologie wymagają przeprowadzenia badań jakościowych na wszystkich etapach ich kształtowania. W związku z tym w niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań mikrostruktury i własności mechanicznych wybranych odkuwek z żebrami ze stopu AZ31 ukształtowanych nową technologią kucia półswobodnego w trójsuwakowej prasie kuźniczej. Analizę prowadzono zarówno dla materiału wyjściowego jak i dla ukształtowanych odkuwek z jednym i dwoma żebrami. Dokonano oceny mikrostruktury i własności mechanicznych stopu AZ31 w stanie dostawy oraz po odkształceniu na gorąco w procesie kucia.

6.1 Badania mikrostruktury

6.1.1 Metodyka badawcza

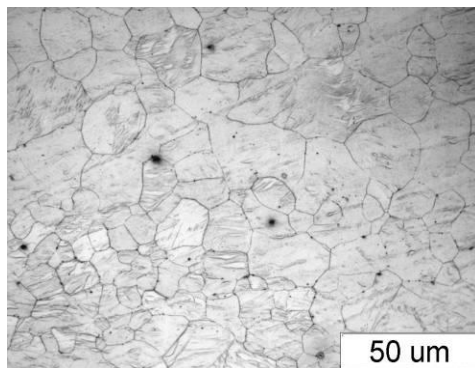
Badania mikrostruktury przeprowadzono dla materiału wyjściowego ze stopu magnezu oraz dla odkuwek ukształtowanych z tego materiału na gorąco w procesie kucia. Materiałem w stanie wyjściowym były próbki ze stopu magnezu AZ31 wycięte z płyty po przeróbce plastycznej (walcowaniu). Do badań wybrano odkuwki z jednym i z dwoma żebrami kształtowane półswobodnie w trójsuwakowej prasie kuźniczej według schematów procesów przedstawionych w rozdziale 5. W celu ujawnienia mikrostruktury wytypowanych obiektów badawczych wykonano zglądy metalograficzne na przekrojach poprzecznych próbek wyciętych z płyty i odkuwek. Zglądy były przygotowywane w oparciu o standardowe procedury poprzez szlifowanie, polerowanie i następnie trawienie ich powierzchni przy użyciu odczynnika stosowanego dla stopów Mg o składzie: 4,2 g kwasu pikrynowego, 70 ml etanolu, 10 ml wody destylowanej, 10 ml kwasu octowego [102]. Na rys. 6.1 przedstawiono odkuwki użyte do badań i wykonane z nich zglądy metalograficzne. Mikrostrukturę stopu AZ31 w stanie wyjściowym i po kuciu analizowano z wykorzystaniem mikroskopii optycznej (OM) i elektronowej (SEM). Badania struktury ukształtowanych odkuwek przeprowadzono na ich przekrojach poprzecznych w trzech strefach oznaczonych na rys. 6.1. Ocenę średniej wielkości ziarna przeprowadzono według normy ASTM E112-10.



Rys. 6.1. Odkuwki płaskie z jednym (a) i dwoma zębami (b) ze stopu AZ31 ukształtowane półswobodnie oraz wykonane z nich zglądy metalograficzne do badań

6.1.2 Wyniki badań i ich analiza

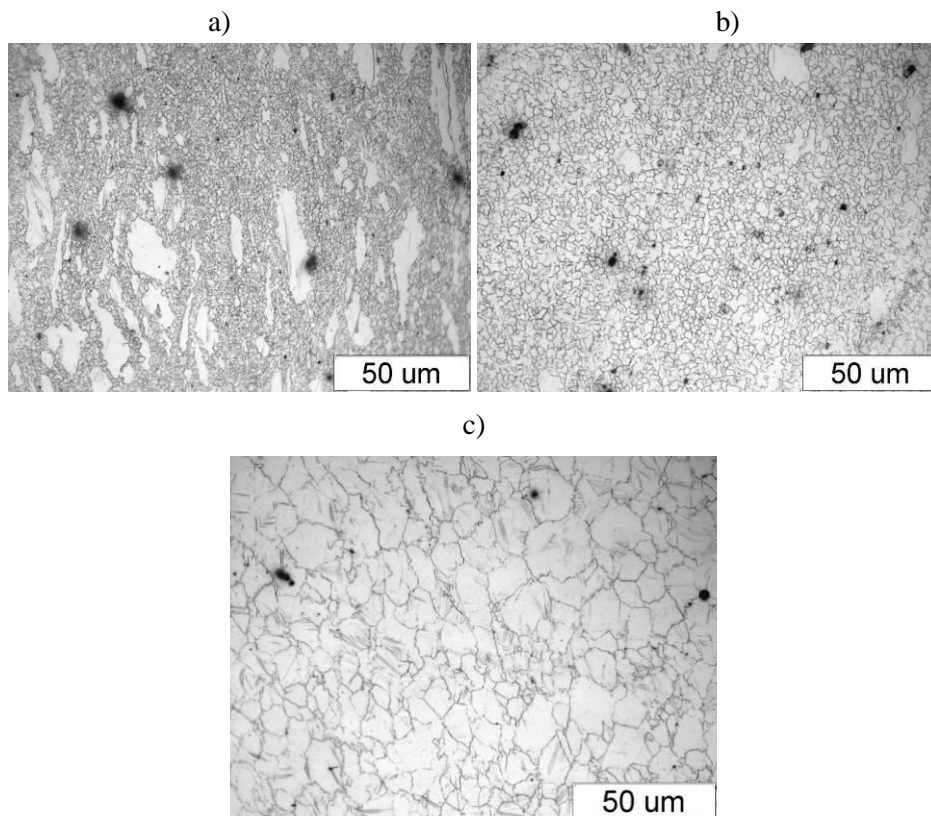
Materiał wyjściowy ze stopu AZ31 odznacza się jednorodną mikrostrukturą złożoną z równoosiowych ziaren o średniej średnicy ok. 11–15 μm , która jest charakterystyczna dla stanu wyżarzonego (rys. 6.2).



Rys. 6.2. Mikrostruktura materiału wyjściowego ze stopu AZ31

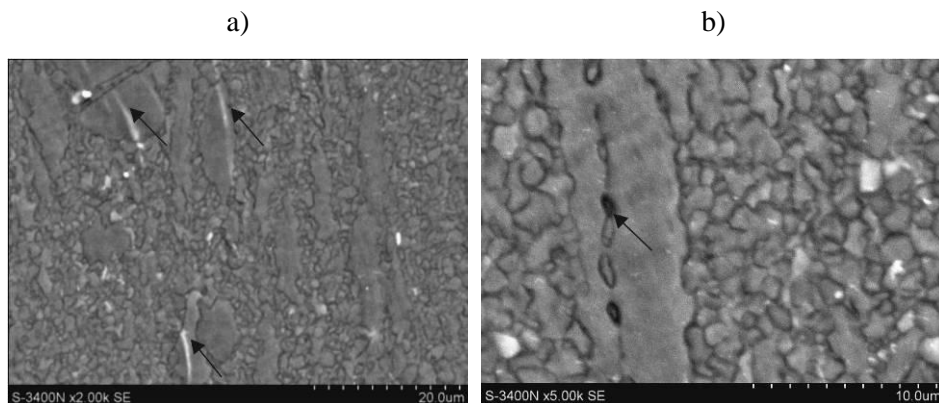
Zmiany zachodzące w mikrostrukturze materiału wyjściowego wywołane procesem kształtowania półswobodnego przedstawiono na przykładzie odkuwki płaskiej z jednym zębem na rys. 6.3. Dla odkuwek z dwoma zębami w analizowanych strefach otrzymano bardzo zbliżone obrazy struktur. W przekrojach poprzecznych ukształtowanych odkuwek zauważono silną lokalizację odkształcenia

w strefach płynięcia materiału w okolicach zębra i w podstawie pod zębem (strefa 1 i 2 co jest widoczne na zdjęciach zglądów na rys. 6.1 b i c). Materiał w tych miejscach jest spęczniony i wyciskany do góry w otwartą przestrzeń ograniczoną powierzchniami narzędzi bocznych. Obserwacje mikroskopowe pokazały, że w strefie 1 i 2 występują bardzo drobne zrekrystalizowane dynamicznie ziarna, o średnim rozmiarze ok. $2,8 \div 4,7 \mu\text{m}$, co jest związane z lokalizacją dużych wartości odkształceń w tych miejscach (rys. 6.3 a i b). W tych obszarach proces rekrytalizacji jest najbardziej zaawansowany. Ponadto w mikrostrukturze zębów w strefie 1 zlokalizowano dodatkowo ziarna pierwotne o średniej średnicy $11,2 \div 15,9 \mu\text{m}$ wydłużone w kierunku odkształcenia, co wskazuje, iż proces rekrytalizacji w tej strefie nie zakończył się w pełni (rys. 6.3 a).



Rys. 6.3. Mikrostruktura odkuwki płaskiej z jednym zębem ze stopu AZ31 odczytana w strefie:
a) 1 – zębra b) 2 – podstawy pod zębem c) 3 – podstawy ;OM

Obserwacje prowadzone na skaningowym mikroskopie elektronowym ujawniły w strefie 1 występowanie bliźniaków odkształcenia (zaznaczone na rys. 6.4 a) oraz pojawienie się w ziarnach wydłużonych granic bliźniaczych (zaznaczone na rys. 6.4 b), które są charakterystyczne przy odkształcaniu stopów magnezu. W mikrostrukturze podstawy odkuwek w strefie 3 zlokalizowano obszar, który uległ niewielkiemu odkształceniu. W tym miejscu ziarna o średniej średnicy $7,9 \div 11,2 \mu\text{m}$ są nieznacznie zdeformowane o czym świadczy ich niewielkie wydłużenie w porównaniu do stanu wyjściowego (rys. 6.3 c).



Rys. 6.4. Mikrostruktura obserwowana w okolicy żebra odkuwki ze stopu AZ31 odczytana w strefie 1; SEM

Widoczne ciemniejsze miejsca (plamki) na zamieszczonych mikrostrukturach (rys. 6.2 i 6.3) mogą oznaczać występowanie mikropustek lub zanieczyszczeń w materiale wyjściowym, lub powstałych przy przygotowaniu próbki do badań metalograficznych.

Na podstawie analizy wyników badań mikrostruktury ukształtowanych odkuwek z żebrami ze stopów magnezu metodą kucia półswobodnego w trójsuwakowej prasie kuźniczej sformułowano następujące wnioski:

- Odkuwki ukształtowane proponowaną metodą charakteryzują się dużą niejednorodnością struktury. Jest to związane przede wszystkim z założonym schematem płynięcia materiału podczas takiego procesu.
- Największe wartości odkształceń zlokalizowane są w obszarach kształtowanych żeber, w tych też miejscach występuje największe rozdrobnienie struktury.
- W celu ujednorodnienia struktury otrzymanych odkuwek ze stopów magnezu wskazane jest przeprowadzenie po procesie kucia dodatkowej obróbki cieplnej, której rodzaj i parametry mogą być kierunkiem dalszych prac badawczych nad opracowaną technologią.

6.2 Badania własności mechanicznych

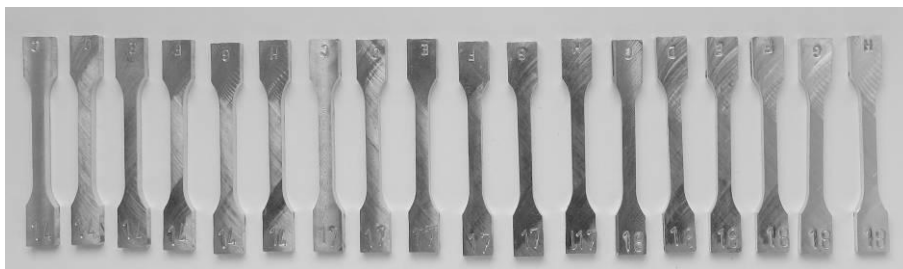
6.2.1 Metodyka badawcza

Badania własności mechanicznych przeprowadzono dla materiału wyjściowego oraz ukształtowanych odkuwek w oparciu o statyczną próbę rozciągania i pomiar twardości. Materiałem wyjściowym były próbki ze stopu magnezu AZ31 wycięte z płyty po przeróbce plastycznej. Do badań wybrano odkuwki z jednym i z dwoma żebrami ukształtowane półswobodnie w trójsuwakowej prasie kuzniczej. Do prób wykorzystano próbki pięciokrotne, które wycięto wzdłuż podstawy odkuwek (strefa 2 i 3) oraz z żebra (strefa 1). Strefy pobrania oznaczono na rys. 6.1 przy opisie badań struktury. Na rysunku 6.5 przedstawiono przykładowe próbki użyte do badań. Dla każdego wariantu (strefy) przygotowano po minimum 3 próbki wytrzymałościowe. Statyczne próby rozciągania przeprowadzono według normy PN-EN 10002-1:2004 w temperaturze pokojowej na maszynie wytrzymałościowej o nacisku 1000 kN. Twardość określono metodą Brinella na przekrojach poprzecznych próbek, stosując wgłębnik w kształcie kulki o promieniu 2,5 mm przy obciążeniu 31,25 kG (jednostka siły podana zgodnie z normą).

a)



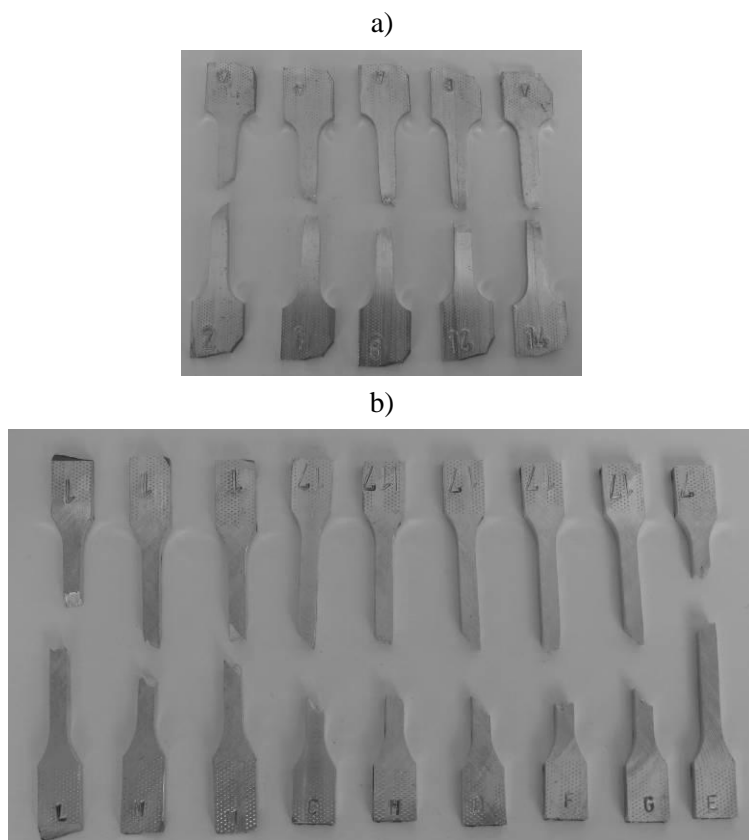
b)



Rys. 6.5. Przykładowe próbki wytrzymałościowe użyte do badań własności mechanicznych pobrane z: a) żeber, b) podstaw odkuwek

6.2.2 Wyniki badań i ich analiza

Przykładowe próbki wytrzymałościowe po zerwaniu przedstawiono na rysunku 6.6. Wyniki badanych własności mechanicznych materiału wyjściowego oraz ukształtowanych odkuwek wsporników przedstawiono w tabeli 6.1. W statycznej próbie rozciągania wyznaczono takie parametry jak: wytrzymałość na rozciąganie R_m , granicę plastyczności R_e , wydłużenie A_5 . Określono również twardość w poszczególnych strefach odkuwki oznaczonych przy badaniach struktury (rys. 6.1).



Rys. 6.6. Przykładowe próbki wytrzymałościowe po zerwaniu użyte do badań własności mechanicznych pobrane z: a) żeber, b) podstaw odkuwek

Tab. 6.1. Własności mechaniczne materiału wyjściowego oraz ukształtowanych odkuwek płaskich z żebrami ze stopu AZ31

Miejsce pobrania próbki do badań	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Granica plastyczności R_e [MPa]	Wydłużenie A_5 [%]	Twardość [HB]
Materiał wyjściowy	290	171	11	64
Strefa 1 odkuwki z jednym żebrzem	365	298	16	76
Strefa 2 odkuwki z jednym żebrzem	335	270	13	72
Strefa 3 odkuwki z jednym żebrzem	310	220	11	69
Strefa 1 odkuwki z dwoma żebrami	350	303	15,5	78
Strefa 2 odkuwki z dwoma żebrami	330	250	13,5	76
Strefa 3 odkuwki z dwoma żebrami	303	216	12	66

Uzyskane wyniki wskazują na niejednolite własności mechaniczne ukształtowanych odkuwek wsporników w całej objętości materiału. W obszarze żebra własności wytrzymałościowe i twardość jest znacznie wyższa w porównaniu do pozostałej części półwyrobu oraz materiału wyjściowego. Wynika to ze specyfiki założonego schematu procesu, który zakłada intensywne odkształcanie w środkowej części materiału wyjściowego czego efektem jest kształtowanie żebra w przestrzeni pomiędzy narzędziami bocznymi. Najlepszymi własnościami plastycznymi charakteryzuje się obszar odkuwek poddany dużym odkształceniom w strefie 1 i 2, dla którego wydłużenie A_5 przyjmuje wartości w przedziale 13–16%.

Duża plastyczność w tych strefach spowodowana jest drobnoziarnistą, w przeważającej części zrekrytalizowaną strukturą opisaną w podrozdziale 6.1. Obszar poddany małym odkształceniom – strefa 3 wykazuje wydłużenie A_5 równe 11–12% tj. na poziomie materiału wyjściowego. Należy nadmienić, że typowym zjawiskiem w procesach kucia jest niejednorodny rozkład parametrów odkształcenia w odkuwce. Uzyskanie dobrych własności mechanicznych wyrobów jest ściśle uzależnione od doboru parametrów kucia (temperatury, prędkości odkształcenia, wartości odkształcenia), które dla analizowanych procesów kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopu AZ31 dokonano na podstawie wyników badań plastometrycznych, przeprowadzonych symulacji MES i prób doświadczalnych.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że ujednoczenie własności wytrzymałościowych ukształtowanych odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu jest możliwe poprzez zastosowanie po procesie kucia dodatkowej obróbki cieplnej.

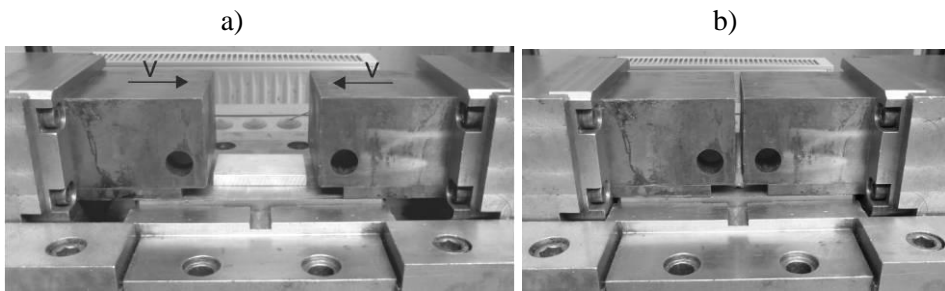
7. PRZYKŁADY PROCESÓW WYTWARZANIA WYROBÓW UŻEBROWANYCH ZE STOPÓW MAGNEZU

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe procesy wytwarzania wsporników z jednym i z dwoma żebrami ze stopów magnezu zaprojektowane na podstawie opracowanych technologii kształtowania odkówek płaskich z żebrami w trójsuwakowej prasie kuźniczej opisanych w rozdziale 5 i 6.

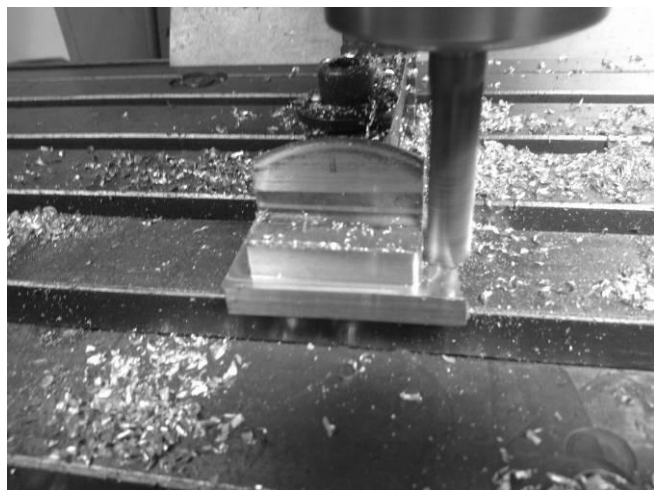
Technologia wytwarzania wspornika z jednym żebrzem ze stopu magnezu AZ31

Proces kształtowania wspornika z jednym żebrzem został przeprowadzony według następujących operacji:

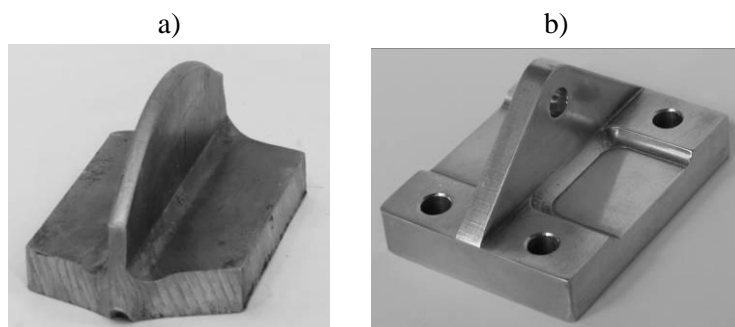
- cięcie wsadu ze stopu AZ31 na wymiar $74 \times 50 \times 9,5$ mm,
- nagrzanie materiału wsadowego do temperatury 410°C i narzędzi do temperatury 200°C ,
- kształtowanie odkuwki w jednym cyklu pracy trójsuwakowej prasy kuźniczej z prędkością narzędzi $v=6$ mm (rys. 7.1),
- frezowanie odkuwki z jednym żebrzem na gotowy wspornik (rys. 7.2 i 7.3).



Rys. 7.1. Schemat procesu kształtowania odkuwki z jednym żebrzem ze stopu AZ31 w trójsuwakowej prasie kuźniczej: a) początek procesu, b) koniec procesu



Rys. 7.2. Frezowanie odkuwki z jednym żebrem na gotowy wspornik

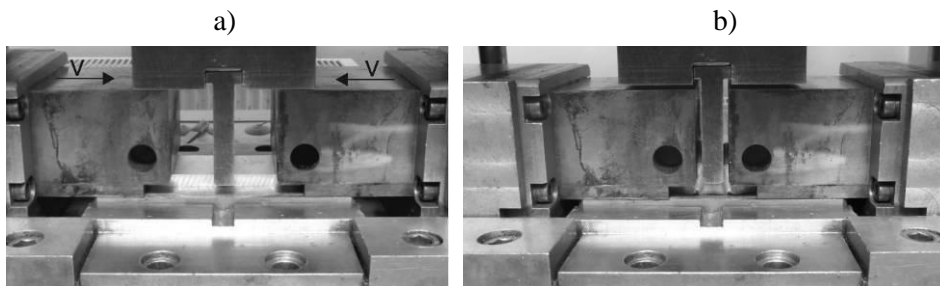


Rys. 7.3. Ukształtowana odkuwka z jednym żebrem ze stopu AZ31 w TPK (a) oraz wykonany z niej gotowy wspornik (b)

Technologia wytwarzania wspornika z dwoma żebrowymi ze stopu magnezu AZ31

Proces kształtowania wspornika z dwoma żebrowymi składa się z następujących operacji:

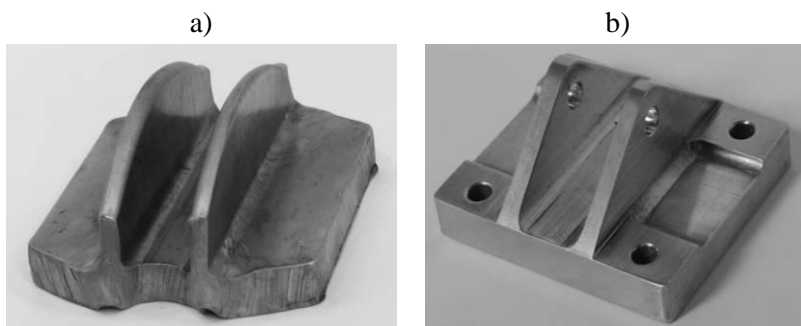
- cięcie materiału na wymiar $114 \times 50 \times 9,5$ mm,
- grzanie materiału wsadowego do temperatury 410°C i narzędzi do temperatury 200°C ,
- kształtowanie odkuwki w jednym cyklu pracy trójsuwakowej prasy kuzniczej z prędkością narzędzi $v=6$ mm (rys. 7.4),
- frezowanie odkuwki z dwoma żebrowymi na gotowy wspornik (rys. 7.5 i 7.6).



Rys. 7.4. Schemat procesu kształtowania odkuwki z dwoma żebrami ze stopu AZ31 w trójsuwakowej prasie kuźniczej: a) początek procesu, b) koniec procesu



Rys. 7.5. Frezowanie odkuwki z dwoma żebrami na gotowy wspornik



Rys. 7.6. Ukształtowana odkuwka z dwoma żebrami ze stopu AZ31 w TPK (a) oraz wykonany z niej gotowy wspornik (b)

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszej pracy przedstawiono nowe możliwości wytwarzania wyrobów z żebrami ze stopów magnezu na podstawie opracowanych nowatorskich metod ich kształtowania plastycznego w trójsuwakowej prasie kuźniczej (TPK). Przeprowadzone badania teoretyczno-doświadczalne potwierdziły skuteczność zaproponowanych wariantów procesów, dzięki którym otrzymano prawidłowe odkuwki płaskie z żebrami ze stopu AZ31 o założonej jakości. Opracowane technologie, które są unikatowe w skali kraju i świata, umożliwiają znaczne oszczędności materiału i uzyskanie wyrobów o dobrych własnościach mechanicznych i użytkowych. Oprócz tego znacznie zmniejszają pracochłonność procesu w stosunku do np. obróbki skrawaniem, dzięki możliwości uzyskania odkuwek (półfabrykatów) w jednym cyklu roboczym prasy, co ma kluczowy wpływ na wzrost wydajności. Przeprowadzone badania potwierdziły zalety stosowania symulacji numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych. Dzięki nim możliwa była wielowariantowa analiza na etapie projektowania procesów. Pozwoliło to dokładniej zaplanować badania doświadczalne i zmniejszyć ich koszty i czas. Przeprowadzona weryfikacja doświadczalna w warunkach laboratoryjnych potwierdziła prawidłowość zamodelowanych technologii. Uzyskane wyniki badań realizowane w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” stanowią teoretyczne i praktyczne podstawy do uruchomienia nowej technologii kształtowania odkuwek płaskich z żebrami ze stopów magnezu w warunkach przemysłowych.

Wyniki analiz teoretycznych oraz badań doświadczalnych pozwoliły na sformułowanie wniosków zarówno o charakterze poznawczym jak i praktycznym.

Główne wnioski poznawcze są następujące:

- Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że możliwe jest kształtowanie plastyczne wyrobów uźebrowanych według opracowanych nowych technologii z wykorzystaniem trójsuwakowej prasy kuźniczej.
- Proces można realizować według dwóch wariantów: metodą kształtowania półswobodnego oraz kształtowania w wykroju zamkniętym. W procesie kształtowania półswobodnego występuje poszerzenie podstawy i nierównomierny kształt żebra, co zwiększa materiałochłonność procesu i ogranicza go do stosowania tylko do odpowiedniej grupy wyrobów z żebrami o zarysie półokrągłym lub trójkątnym. Zaletą tej metody w stosunku do kształtowania w wykroju zamkniętym jest mniejszy koszt narzędzi. Kucie w wykroju zamkniętym pozwala wykonać odkuwki z wyższymi żebrami o zarysie prostokątnym lub trójkątnym i podstawie prostokątnej o szerokości równej szerokości wsadu. Wadą tej metody jest złożona konstrukcja narzędzi co rzutuje na ich koszt, a także niedogodność związana z ułożeniem w wykroju wsadu do kucia.

- Na podstawie uzyskanych wyników zidentyfikowano najważniejsze parametry procesu oraz zjawiska ograniczające jego prawidłowy przebieg. Do istotnych parametrów technologicznych kształtowania wyrobów uźebrowanych ze stopów magnezu należą: długość wsadu, grubość wsadu, długość swobodna spęczanego wsadu, warunki tarcia pomiędzy wsadem i narzędziami, temperatura wsadu, temperatura narzędzi. Do głównych zjawisk zakłócającymi stabilny przebieg procesu zaliczono: wyboczenie, zakucie, pękanie, błędy kształtu odkuwki.
- Istotny wpływ na przebieg procesu ma współczynnik spęczania wyrażony stosunkiem długości swobodnej kształtowanej części wsadu do jego grubości. Realizacja procesu przy współczynniku spęczania większym od wartości granicznej prowadzi do uzyskania odkuwki wadliwej posiadającej wyboczenie, a w konsekwencji dalszego spęczania zakucie w podstawie. Wyznaczone graniczne wartości współczynników spęczania dla badanych procesów kształtowania stopu AZ31 wynoszą odpowiednio: $k_{gr}=3,57$ dla kucia półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z jednym żebrzem, $k_{gr}=3,36$ dla kucia w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z żebrzem o zarysie trójkątnym, $k_{gr}=3,1$ dla kucia półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek płaskich z dwoma żebrami. Zatem prawidłowe odkuwki uźebrowane ze stopów magnezu dla rozpatrywanych przypadków można kształtować dla współczynnika spęczania mniejszego od wyznaczonych wartości granicznych. Należy nadmienić, że graniczny współczynnik spęczania powinien być wyznaczany w badaniach doświadczalnych ponieważ wyniki obliczeń MES w tym zakresie obarczone są dużym błędem.
- Na podstawie przeprowadzonych badań stopu AZ31 i MgAl4Zn stwierdzono, że bardzo ważnym parametrem procesu jest temperatura kształtowanego stopu magnezu, która w dużym stopniu zależy od temperatury narzędzi. Zbyt niskie wartości tego parametru uniemożliwiają wykonanie prawidłowego wyrobu z uwagi na występowanie pęknięć. Ze względu na wąski zakres obróbki plastycznej na gorąco stopów Mg należy stosować wstępne podgrzewanie narzędzi do temperatury 250°C przy użyciu specjalnych systemów grzewczych.
- W procesach kształtowania odkuwek uźebrowanych mogą wystąpić zjawiska związane z błędami kształtu odkuwki takie jak: nierównomierność żeber, poszerzenie podstawy, wypływka czołowa czy niewypełnienie wykroju. Wymienione trzy pierwsze ograniczenia mają jednak mniejsze znaczenie, gdyż stosując dodatkowe operacje obróbkowe można je wyeliminować. Niewypełnienie wykroju w przypadku kształtowania odkuwki z żebrzem o zarysie trójkątnym dyskwalifikuje całkowicie wyrób.

- Najkorzystniejsze warunki kształtowania odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu uzyskuje się bez smarowania. W szczególności ma to znaczenie przy kształtowaniu półswobodnym, gdzie tarcie sprzyja uzyskaniu odkuwek z wyższymi żebrami i mniejszym poszerzeniem podstawy. W przypadku kucia w wykroju zamkniętym warunki tarcia nie wpływają znacząco na końcową jakość odkuwek.
- Ukształtowane odkuwki z jednym i z dwoma żebrami ze stopu AZ31 wytypowane do badań jakościowych charakteryzują się niejednorodną strukturą i własnościami mechanicznymi, co jest typowe dla procesów kucia.

Do głównych wniosków o charakterze praktycznym należą:

- Stosując opracowane technologie kształtowania w trójsuwakowej prasie kuźniczej można skutecznie i efektywnie wytwarzać odkuwki płaskie z żebrami ze stopów magnezu. Obecnie części uźebrowane wykonuje się głównie metodami obróbki skrawaniem. Przedstawione w pracy metody kształtowania plastycznego pozwolą poprawić jakość wyrobów przy jednoczesnym obniżeniu ich kosztów produkcji (zmniejszenie robocizny i zużycia materiałów oraz zwiększenie wydajności procesów).
- Kształtowanie odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu według opracowanych sposobów należy realizować w prasie wyposażonej w trzy ruchome suwaki.
- Do wytwarzania grupy wyrobów z żebrami o zarysie półokrągłym i trójkątnym zaleca się stosowanie kształtowania półswobodnego lub kształtowania w wykroju zamkniętym z żebrami o zarysie trójkątnym. Elementy płaskie z żebrami prostokątnymi należy kształtować w wykroju zamkniętym.
- Istotnym parametrem procesu kształtowania odkuwek z żebrami decydującym o uzyskaniu wyrobu pozbawionego wad jest współczynnik spęczania k ($k=l_s/g_0$, gdzie: l_s – długość swobodna spęczanego wsadu, g_0 – grubość wsadu). Na podstawie badań stwierdzono, że prawidłowe odkuwki z żebrami ze stopu AZ31 dla różnych wariantów procesów można uzyskać dla współczynnika spęczania: $k \leq 3,57$ dla kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek z jednym żebrami, $k \leq 3,36$ dla kształtowania w wykroju odkuwek z żebrami o zarysie trójkątnym, $k \leq 3,1$ dla kształtowania półswobodnego i w wykroju zamkniętym odkuwek z dwoma żebrami. Należy wspomnieć, że przy kształtowaniu innych gatunków stopów magnezu należy zweryfikować wartość współczynnika spęczania doświadczalnie, gdyż zależy on również od rodzaju kształtowanego materiału.
- Przy kształtowaniu odkuwek uźebrowanych ze stopów magnezu należy proces prowadzić na gorąco z podgrzewaniem wsadu do temperatury kucia danego

- gatunku (np. stopu AZ31 do temp. 410°C) oraz narzędzi do odpowiedniej temperatury np. 250°C przy użyciu specjalnych systemów grzewczych.
- Niedrogim i skutecznym systemem grzewczym do podgrzewania narzędzi jest układ wyposażony w grzałki patronowe umieszczane bezpośrednio w narzędziach sterowane za pomocą regulatora temperatury.
 - W celu ukształtowania odkuwek płaskich z wysokimi żebrami ze stopu AZ31 zaleca się realizację procesów bez użycia środków smarnych.
 - W przypadku, gdy wymagana jest jednorodna struktura i własności mechaniczne w całej objętości odkuwki wskazane jest przeprowadzenie po procesie kształtowania dodatkowej obróbki cieplnej.

Pozytywne wyniki badań wskazują na fakt, że opracowana technologia w aplikacjach przemysłowych może być rozpatrywana jako korzystna alternatywa dla dotychczas stosowanych metod. W związku z tym rozważając dalsze kierunki prac należy uwzględnić poszukiwanie potencjalnych zakładów, które mogłyby te rozwiązania wdrożyć. Wówczas prace badawcze nad opracowaną technologią będą skierowane pod konkretne części użebrowane. Celowe jest również przeprowadzenie badań nad określeniem rodzaju i parametrów obróbki cieplnej dla ukształtowanych odkuwek użebrowanych ze stopów magnezu. Należy dodać, że opracowane metody wytwarzania mogą być zaimplementowane również w odniesieniu do innych niż stopy magnezu gatunków materiałów.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Agnew S. R., Duygulu O., *Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B*, International Journal of Plasticity, 2005, Vol. 21, Issue 6, s. 116–1193.
2. AMTS Technology Center, <http://www.palbam-defense.com/amts.html> [dostęp kwiecień 2015].
3. Arentoft M., Bay N., Tang P. T., Jensen J. D., *A new lubricant carrier for metal forming*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, Vol. 58, Issue 1, s. 243–246.
4. ASM Designation: B91-97, *Standard specification for magnesium-alloy forgings*.
5. Avedesian M., Baker H., *ASM Speciality handbook. Magnesium and magnesium alloys*, The Materials Information Society, USA 1999.
6. Bajor T., Muskalski Z., *Badania wpływu czasu międzyoperacyjnej obróbki cieplnej na przebieg procesu ciągnięcia i własności mechaniczne drutów ze stopu magnezu AZ31*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2009, Vol. 54, nr 11, s. 697–700.
7. Balewander T., Bieniasz Ł., Śliwa R. E., *Wyciskanie przeciwbieżne kształtowników ze stopu magnezu AZ31*, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 2012, nr 8, s. 526–534.
8. Banaszak R., Dubicki K., Muster A., *Obróbka plastyczna, Laboratorium z podstaw*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1985.
9. Bławert C., Hort N., Kainer K.U., *Automotive applications of Mg and its alloys*, Transactions of the Indian Institute of Metals, 2004, Vol. 57, Issue 4, s. 397–408.
10. Bogdanow J., Szabelski K., *Podstawy konstrukcji śmigłowców*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
11. Budka A., Kayzer D., Pietruczuk K., Szoszkiewicz K., *Zastosowanie wybranych procedur do wykrywania obserwacji nietypowych w ocenie jakości rzek*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2013, Nr 3, s. 85–95.
12. Bulzak T., Tomczak J., Pater Z., *Theoretical and experimental research on forge rolling process of preforms from magnesium alloy AZ31*, Archives of Metallurgy and Materials, 2015, Vol. 60, s. 439–445.
13. Chen F., Huang T., Chen S., *Embossment formation in press forging of AZ31 magnesium-alloy sheets*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, Vol. 32, Issue 3-4, s. 272–279.

14. Chen F., Huang T., Wang S., *A study of flow-through phenomenon in the press forging of magnesium-alloy sheets*, Journal of Materials Processing Technology, 2007, Vol. 187–188, s. 770–774.
15. Chromiński K., Tkacz M., *Comparison of outlier detection methods in biometrical data*, Journal of Medical Informatics and Technologies, 2010, Vol. 16, s. 89–94.
16. Cockcroft M. G., Latham D. J., *Ductility and the workability of metals*, Journal of the Institute of Metals, 1968, Vol. 96, s. 33–39.
17. Davis J., Destefani J., Zorc T., *ASM Metals handbook. Forming and forging*, ASM International, USA 1998.
18. Dean R.B., Dixon W.J., *Simplified statistics for small numbers of observations*, Analytical Chemistry, 1951, Vol. 23, Issue 4, s. 636–638.
19. Dixon W.J., *Analysis of extreme values*, Annals of Mathematical Statistics, 1950, Vol. 21, s. 488–506.
20. Dobrzański L. A., *Stopy metali lekkich*, http://157.158.19.181/platforma-/file.php/1/prezentacje/Stopy_metali_lekkich.pdf, Gliwice 2007 [dostęp kwiecień 2015].
21. Dziubińska A., Gontarz A., *Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z dwoma żebrami*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent 214519, Zatwierdzony 28.01.2013 r.
22. Dziubińska A., Gontarz A., *Sposób kształtowania plastycznego półswobodnego wyrobów płaskich z jednym żebrzem*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent 214530, Zatwierdzony 28.01.2013 r.
23. Dziubińska A., Gontarz A., *Sposób kucia półfabrykatu zwłaszcza do wytwarzania wyrobów płaskich z jednym żebrzem o zarysie trójkątnym*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent 395408, Zatwierdzony 25.06.2013 r.
24. Friedrich H., Mordike B., *Magnesium technology*, Springer, Stuttgart 2006.
25. Gałkin A. M., *Badania plastometryczne metali i stopów*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1990.
26. Gierzyńska M., *Tarcie zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
27. Gontarz A., Dziubińska A., *Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z dwoma żebrami*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent 214520, Zatwierdzony 28.01.2013 r.
28. Gontarz A., Dziubińska A., *Sposób kształtowania plastycznego w wykroju zamkniętym wyrobów płaskich z jednym żebrzem*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Patent 214513, Zatwierdzony 28.01.2013 r.
29. Gontarz A., *Efektywne procesy kształtowania w trójsuwakowej prasie kuźniczej*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.

30. Gontarz A., *Maszyny i przyrządy kuźnicze o złożonym ruchu narzędzi kształtujących*, Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s. 123–142.
31. Gontarz A., Myszak R., *Forming of external step of shafts in three slide forging press*, Archives of Metallurgy and Materials, 2010, Vol. 55, Issue 3, s. 689–694.
32. Gontarz A., Pater Z., Drozdowski K., Doleba R., *Weryfikacja teoretyczna procesu kucia matrycowego odkuwki dźwigni ze stopu AZ80*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2012, nr 5, s. 305–311.
33. Gontarz A., Pater Z., Drozdowski K., *Hammer forging process of lever drop forming from AZ31 magnesium alloy*, Metalurgija, 2013, Vol. 52, Issue 3, s. 359–362.
34. Gontarz A., Pater Z., Dziubińska A., Winiarski G., Drozdowski K., *Badania teoretyczno-doświadczalne procesu kucia matrycowego stopów magnezu*, Mechanik, 2013, nr 8–9, s. 646–657.
35. Gontarz A., Pater Z., Samołyk G., Tofil A., *Forging of connecting rod without flash*, Steel Research International, 2010, Vol. 81, s. 358–361.
36. Gontarz A., Pater Z., Tofil A., *Numerical analysis of unconventional forging process of hollowed shaft from Ti-6Al-4V alloy*, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, Vol. 16, s. 162–166.
37. Gontarz A., Pater Z., Tomczak J., Winiarski G., *Theoretical and experimental research on a method for producing a triangular rosette-shaped flange*, Key Engineering Materials, 2014, Vol. 622–623, s. 1166–1172.
38. Gontarz A., Piesiak J., *Model pękania według kryterium Cockrofta-Lathama dla stopu magnezu MA2 w warunkach kształtowania na gorąco*, Obróbka Plastyczna Metali, 2010, nr 4, s. 217–227.
39. Gontarz A., *Theoretical and experimental research of hammer forging process of rim from AZ31 magnesium alloy*, Metalurgija, 2014, Vol. 53, Issue 4, s. 645–648.
40. Grosman F. (red.), *Technologia metali*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
41. Gwynne B., Lyon B., *Magnesium alloys in aerospace applications*, Past Concerns, Current Solutions Magnesium, Triennial International Aircraft Fire & Cabin Safety Research Conference, 2007, http://www.fire.tc.faa.gov-/2007conference/files/Materials_Fire_Safety/WedAM/GwynneMagnesium/GwynneMagnesiumPres.pdf [dostęp maj 2015].

42. Hadasik E., Kuc D., Szula A., *Kształtowanie plastyczne stopu magnezu AZ31*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2010, Vol. 55, nr 6, s. 313–318.
43. Hadasik E., Kuc G., Niewielski G., Śliwa R., *Rozwój stopów magnezu do przeróbki plastycznej*, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2009, nr 8, s. 580–584.
44. Hadasik E., Ploch A., Schindler I., Machulec B., *Wykorzystanie technik komputerowych do realizacji badań plastometrycznych*, Materiały III Konferencji nt. Zastosowanie Komputerów w Zakładach Przetwórstwa Metali KomPlasTech '96, Koninki, 8–10 stycznia 1996, s. 41–48.
45. Henn Y., Fein A., *Project MagForming - Development of new magnesium forming technologies for the aeronautics industry*, Publishable Final Activity Report, 2010, s. 1–58.
46. Hombergsmeier E., Fein A., *MagForming - Development of new magnesium forming technologies for the aeronautic industry*, Sixth European Aeronautics Days – Aerodays, Madrid 2011.
47. <http://criticalrawmaterials.org/critical-raw-materials/magnesium/> [dostęp maj 2015].
48. <http://www.4metal.pl> [dostęp lipiec 2014].
49. <http://www.4wd.com> [dostęp lipiec 2014].
50. http://www.anydiecasting.com/engine_bracket_support_automotive_die_casting_aluminum.html [dostęp lipiec 2014].
51. <http://www.composites.nl> [dostęp lipiec 2014].
52. <http://www.custommachinedcomponents.com> [dostęp lipiec 2014].
53. <http://www.farmexpert.pl> [dostęp lipiec 2014].
54. <http://www.grzalka.pl/index.php/grzalka-grzalki-patronowe> [dostęp maj 2015].
55. <http://www.handtmann.de> [dostęp sierpień 2014].
56. <http://www.kumz.ru/eng/win/download/176/> [dostęp maj 2015].
57. http://www.otto-fuchs.com/fileadmin/user_upload/images/pdf/Fuchs_WI_-_Mg_GB_Scr.pdf [dostęp maj 2015].
58. <http://www.polmag.pl> [dostęp lipiec 2014].
59. <http://www.przemot.pl> [dostęp lipiec 2014].
60. <http://www.rvten.com> [dostęp sierpień 2014].
61. http://www.schultecorp.com/site/works_aerospace.htm [dostęp lipiec 2014].
62. <http://www.seekpart.com> [dostęp lipiec 2014].
63. <http://www.sklepkiziel.pl> [dostęp lipiec 2014].
64. <http://www.zsaio.jalbum.net> [dostęp sierpień 2014].
65. International magnesium association, *magnesium: framework for innovation*, Mg Showcase Issue 12, 2010, <http://intlmg.org/showcase/index.cfm> [dostęp kwiecień 2015].

66. Iwanaga K., Tashiro H., Okamoto H., Shimizu K., *Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ31 magnesium alloy*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 155–156, s. 1313–1316.
67. Joun M. S., Moon H. G., Choi I. S., Lee M.C., Jun B. Y., *Effects of friction laws on metal forming processes*, Tribology International, 2009, Vol. 42, Issue 2, s. 311–319.
68. Kainer K., *Magnesium – Alloys and Technologies*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2003.
69. Karaś M., *Zastosowanie magnezu w elektronice i w urządzeniach codziennego użytku*, <http://inzynieria.powierzchni.blogspot.com/p/-magnez.html>.
70. Kevorkijan V., Smolar T., Dragojevic V., Lenarčić D., *AZ80 and ZC71/SiC/12P closed die forgings for automotive applications - technical and economic assessment of possible mass production*, Metalurgija Journal of Metallurgy, 2003, Vol. 9, s. 23-36.
71. Kibler H., *Effiziente Serienproduktion von Magnesium-Bauteilen*, Weisensee Warmpressteile errichtet innovative Schmiedelinie, Wissensportal baumaschine.de 3, 2013, s. 1–3.
72. Konieczko P., Namieśnik J., *Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych*, WNT, Warszawa 2007.
73. Kuc D., Hadasik E., Gontarz A., *Technologia kucia stopów magnezu*, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 2012, nr 8, s. 610–613.
74. Kulekci M.K., *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39, s. 851–865.
75. Lawrowski Z., *Tribologia, tarcie, zużycie i smarowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
76. Legerski M., Hadasik E., Kuc D., *Deformation resistance and structure of a hot-rolled AZ31 magnesium alloy*, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, 2008, nr 8, s. 494–496.
77. Lubiewski T., *Wspornik silnika*, Numer wzoru przemysłowego PL18258, Data udzielenia prawa ochronnego ogłoszono w WUP/07/2012 w dniu 31.07.20012.
78. Matsumoto R., *Ductility improvement methods for commercial AZ31B magnesium alloy in cold forging*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, Vol. 20, s. 1275–1281.
79. Matsumoto R., Osakada K., *Development of warm forging method for magnesium alloy*, Materials Transactions, 2004, Vol. 45, Issue 9, s. 2838–2844.

80. McBane G., *Programs to compute distribution functions and critical values for extreme value ratios for outlier detection*, Journal of Statistical Software, 2006, Vol. 16, Issue 3, s. 1–9.
81. Mroczkowski M., *Prognozowanie stateczności plastycznego płynięcia metali i ocena przydatności projektowanych narzędzi z wykorzystaniem metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica, Kraków 2008.
82. Nishida S., Fukudome K., Kudo J., Motomura M., *Production magnesium alloy strip with boss and rib section by melt drag process and experimental conditions*, Materials Science Forum, 2010, Vol. 654-656, s. 1468–1471.
83. Oczóś K., Kawalec A., *Kształtowanie metali lekkich*, PWN, Warszawa 2012.
84. Palaniswamy H., Ngaile G., Altan T., *Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 145, Issue 1, s. 52–60.
85. Pater Z., Gontarz A., Weroński W., *Obróbka plastyczna – obliczenia sił kształtowania*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2002.
86. Pater Z., *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001.
87. Pegguleryuz M., Kainer K., Kaya A., *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*, Woodhead Publishing, Nowe Delhi 2013.
88. Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A., *Odlewnictwo*, WNT, Warszawa 2004.
89. Płonka B., Lech-Grega M., Remsak K., Korczak P., Kłyszewski A., *Kucie matrycowe wysokowytrzymałych stopów Mg - Struktura i właściwości mechaniczne w różnych stanach obróbki cieplnej*, Archives of Metallurgy and Materials, 2013, Vol. 58, Issue 1, s. 127–132.
90. Prasad Y.V.R., Sasidhara S., *Hot working guide. A Compendium of processing maps*, ASM International, USA 1997.
91. Romanowski S., *Technologia śmigłowców*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
92. Samołyk G., *Analiza numeryczna kształtowania stopu AZ31 sposobem prasowania obwiedniowego na ciepło*, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 2009, nr 8, s. 653–656.
93. Saternus M., *Magnez - technologia, produkcja, perspektywy*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2008, Vol. 53, nr 6, s. 337–349.
94. Shan D., Xu W., Han X., Huang X., *Study on isothermal precision forging process of rare earth intensifying magnesium alloy*, Materials Science and Engineering B, 2012, Vol. 177, Issue 19, s. 1698–1702.

95. Sheldon R., *Magnesium and its alloys*, John Wiley&Sons Inc., New York 1960.
96. Shimizu Y., Yamamoto A., Mukai T., Shirai Y., Kano M., Kudo T., Kanetaka H., Kikuchi M., *Medical application of magnesium and its alloys as degradable biomateriale*, Interface Oral Health Science 2009, 2010, s. 318–320.
97. Skrzypek S. J., Przybyłowicz K., *Inżynieria metali i ich stopów*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2011.
98. Skubisz P., Sińczak J., Sotek A., *Extrusion of magnesium alloy profiles*, Steel Grips, 2004, Vol. 2, Issue 3, s. 171–176.
99. Skubisz P., Sińczak J., Bednarek S., *Forgeability of Mg-Al-Zn magnesium alloys in hot and warm closed die forging*, Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 177, s. 210–213.
100. Takara A., Chian L., Chung S. W., Somekawa H., Watanabe H., Takigawa Y., Higashi K., *Suppression of macroscopic defects through the control of friction between workpiece and dies in a forged magnesium alloy part with ribs*, Materials Transactions, 2008, Vol. 49, Issue 5, s. 898–902.
101. Tomczak, J., Gontarz, A., Pater, Z., Drozdowski, K., *Comparative research on aluminum alloys PA31 and 2618A in the aspect of application in aviation structures*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2010, Vol. 6, s. 333–337.
102. Voort G., *Metallography of Magnesium and its alloys*, Tech-Notes, 2004, Vol. 4, Issue 2, s. 1–7.
103. Wang Q., Zhang Z., Zhang X., Yu J., *Precision forging technologies for magnesium alloy bracket and wheel*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, Vol. 18, s. 205–208.
104. www.dw.de [dostęp maj 2015].
105. Yeh C., *Lightweight alloy application to the sports and leisure industry*, http://www.sports.org.tw/e/report/2010yearbook_subject/03lightweight.htm 1 [dostęp maj 2015].
106. Zhang D.W., Yang H., Sun Z.C., *Analysis of local loading forming for titanium-alloy T-shaped components using slab method*, Journal of Materials Processing Technology, 2010, Vol. 210, Issue 2, s. 258–266.
107. Zhang S. H., Zhang K., Xu Y. C., Wang Z.T., Xu Z. G., Wang Z. G., *Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures*, Journal of Materials Processing Technology, 2007, Vol. 142, 147–151.



Biblioteka Cyfrowa
Politechniki Lubelskiej



Działalność wydawnicza
Politechniki Lubelskiej

ISBN: 978-83-7947-209-3



Publikacja bezpłatna.

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.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

