



POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

**KATEDRA KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA
I TECHNOLOGII OBRÓBKI PLASTYCZNEJ**

mgr inż. Jarosław Magryta

***Analiza teoretyczna i doświadczalna procesu
kształtowania wyrobów drążonych metodą
obciskania obrotowego***

Rozprawa doktorska

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater

Lublin 2010

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract.....	5
Wykaz oznaczeń.....	7
1. Wprowadzenie	9
2. Analiza stanu zagadnienia	11
2.1. Wyroby drążone w budowie maszyn	11
2.2. Metody wytwarzania osi i wałków drążonych	15
2.3. Walcowanie klinowo-rolkowe.....	26
2.4. Podsumowanie stanu zagadnienia	34
3. Cel, teza i zakres pracy.....	40
4. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego wyrobów drążonych	43
4.1. Podstawy procesu obciskania obrotowego	43
4.2. Zakres obliczeń.....	45
4.3. Stan odkształceń plastycznych	48
4.4. Siły w procesie obciskania obrotowego	55
4.5. Zmiana grubości ścianki.....	61
4.6. Podsumowanie wyników analizy teoretycznej.....	66
5. Badania doświadczalne	67
5.1. Stanowisko badawcze.....	67
5.2. Próby kształtowania odkuwek ze stali.....	69
5.2.1. Próbkki stalowe wykorzystane w badaniach doświadczalnych	69
5.2.2. Zakres badań doświadczalnych	72
5.2.3. Uzyskane wyniki	76
5.3. Próby kształtowania odkuwek z metali nieżelaznych	84
6. Propozycje zastosowania metody obciskania obrotowego.....	91
6.1. Odkuwka stopniowanego wałka drążonego	91
6.2. Odkuwka sworznia drążonego.....	99
7. Podsumowanie i wnioski końcowe	107
8. Literatura	110

Analiza teoretyczna i doświadczalna procesu kształtowania wyrobów drażonych metodą obciskania obrotowego

Streszczenie

W pracy doktorskiej przedstawiono stan zagadnienia dotyczący wykorzystania różnych technologii wytwarzania wyrobów drażonych. W wyniku przeprowadzonej analizy literatury specjalistycznej, dokonano przeglądu metod otrzymywania tego typu elementów, w głównych gałęziach przemysłu, tj.: przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz maszynowym.

Na podstawie procesu walcowania klinowo-rolkowego (WKR), opracowano nowy schemat procesu. W metodzie WKR do kształtowania wyrobu wykorzystywane są jeden klin płaski oraz dwie rolki profilowe. W nowym procesie zaproponowano zastąpienie segmentu klinowego szczęką płaską. Technologię tą nazwano obciskaniem obrotowym. Wyróżniono dwa układy usytuowania wykonywanego przewężenia w odkuwce, tj. w jej części centralnej oraz na jej końcach. Dla opracowanego schematu procesu obciskania obrotowego, wyprowadzono zależności uwzględniające jego uwarunkowania geometryczne.

W następnej części pracy przedstawiono rezultaty z przeprowadzonej analizy teoretycznej bazującej na obliczeniach numerycznych badanego procesu kształtowania. Ze względu na złożony charakter kształtowania symulacje numeryczne, wykonane w oparciu o metodę elementów skończonych (MES), prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia (3D). Analizie poddano wpływ głównych parametrów procesu na jakość wykonania wyrobów drażonych. Otrzymane rezultaty obliczeń pozwoliły na analizę: rozkładów odkształceń, zmiany grubości ścianek, wielkości owalizacji w odkuwkach obciskanych oraz parametrów siłowych.

W kolejnym rozdziale pracy opisano badania doświadczalne procesu obciskania obrotowego. Weryfikacji opracowanych modeli MES obciskania wyrobów drążonych dokonano na walcierce laboratoryjnej LUW-2, którą wyposażono w trzy zestawy szczęk płaskich i parę rolek. W trakcie prób obciskano wałki drążone (w części centralnej) ze stali C45 i R35 oraz metali lekkich (stop tytanu Ti6Al4V i stop aluminium 6061).

W ostatnim rozdziale pracy zaprezentowano możliwości praktycznego zastosowania obciskania obrotowego. Przedstawiono tu dwa przykłady wyrobów drążonych, stopniowanego wałka i sworznia. W oparciu o zdobyte doświadczenia zaprojektowano narzędzia oraz zweryfikowano przyjęte rozwiązania w symulacji numerycznej.

The theoretical and experimental analysis of forming process hollowed parts of the method rotary compression

Abstract

In this dissertation the issues concerning different technologies of hollowed products manufacturing are presented. In the issue of specialized literature, a review of methods for obtaining this type of components for major industries such as automotive, aerospace and engineering were analyzed.

On the basis of wedge-rolls rolling process (WRR), a new scheme of the process was made. In the method WRR of forming products, one flat wedge and two rolls profile were used. In the new process the segment of wedge to replace flat jaw was proposed. This technology was called rotary compression. It has two distinctive positioning systems carried out in forging narrowing in its central area and at the end. For the processed scheme of rotary compression process, the dependencies of geometrical aspects were introduced.

The next section, the results of theoretical analysis on the basis of numerical calculations of the test development forming process were introduced. Due to the complex nature of forming the numerical simulations based on finite element method (FEM) was carried out in terms of the spatial deformation (3D). The impact of key process parameters on the quality of our products hollow were analyzed. The results of calculation allowed analysis of strain distributions, changing wall thickness, size ovalisation in forging and force parameters.

In the next chapter, the describe experimental studies of rotary compression process were presented. Verification of FEM models compression hollow products in the mill laboratory UCS-2 were carried, which was equipped with three sets of flat jaws and a pair of flat rolls. During the trial of forming hollow shafts in central

part of the steel C45 and R35, and light materials (titanium alloy Ti6Al4V and aluminum alloy 6061).

In the last chapter of this dissertation is devoted for the possibility of practical application to used rotary compression. Two examples of products, stepped hollow shaft and hollow pin were presented here. On the basis of experience the tools were designed and these solutions were verified in the numerical simulations.

Wykaz oznaczeń

A_5	– wydłużenie,
E	– moduł Young’a,
F	– siła,
F_x	– siła styczna (wciskająca),
F_y	– siła osiowa (rozporowa),
HB	– twardość Brinella,
L_{kal}	– długość strefy kalibrowania,
L	– całkowita długość szczęki płaskiej,
R_e	– granica plastyczności,
R_m	– granica wytrzymałości na rozciąganie,
T	– temperatura,
WKR	– walcowanie klinowo-rolkowe,
WPK	– walcowanie poprzeczno-klinowe,
c	– ciepło właściwe,
d	– średnica (średnica uzyskana w procesie kształtowania)
d_0	– średnica wsadu,
d_R	– średnica rolek,
g	– grubość,
h_{sz}	– wysokość występu szczęki płaskiej,
l	– długość kształtowania,
m	– czynnik tarcia,
t	– czas,
v	– prędkość liniowa,
x, y, z	– układ współrzędnych kartezjańskich,
α	– kąt kształtujący,
α_T	– współczynnik rozszerzalności liniowej,

β	– kąt rozwarcia klina,
δ	– stopień gniotu,
ε	– intensywność odkształcenia,
γ	– kąt wzniosu,
λ	– przewodność cieplna
μ	– współczynnik tarcia,
ν	– liczba Poissona,
ρ	– gęstość,
ω	– prędkość kątowna,
ξ	– współczynnik d_R/d_0 ,
ψ	– kąt rozstawu rolki.

1. Wprowadzenie

Udział wyrobów drażonych w produkcji przemysłowej jest coraz większy, zmniejszając tym samym zapotrzebowanie na elementy pełne. Niewątpliwie najprostszą metodą obniżającą masę konstrukcji jest zastępowanie elementów pełnych ich odpowiednikami drażonymi. Dotyczy to przede wszystkim wałów, osi i belek o niezbędnej sztywności, które na pierwszy rzut oka są podobne do siebie. Rozwiązania te znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, między innymi w budownictwie i budowie maszyn. Związane jest to z obniżeniem kosztów produkcji, oszczędnością materiału, energii, zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych oraz pozyskiwaniem nowych rynków zbytu.

Rozwój nowoczesnych technologii kształtowania umożliwia nowe zastosowania elementów drażonych. Części takie znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i maszynowym [56, 58, 60]. Tendencja ta ma miejsce również w obróbce plastycznej metali, która jest jedną z głównych technik wytwarzania elementów maszyn.

W prezentowanej pracy przedstawiono nową metodę kształtowania poprzecznego bazującą na walcowaniu klinowo-rolkowym (WKR), nazwaną obciskaniem obrotowym. Klin stosowany w WKR zastąpiono płaską szczęką górną, której zastosowanie pozwoliło na zmianę kierunku płynięcia materiału z osiowego na promieniowy. Ma to uzasadnienie w przypadku kształtowania wyrobów drażonych, gdyż może prowadzić do zwiększenia grubości ścianki wytwarzanego wyrobu.

W opracowaniu przedstawiono rezultaty wykonanych obliczeń numerycznych. Opracowano modele teoretyczne procesu obciskania obrotowego, w których skupiono się na usytuowaniu strefy odkształcenia oraz na wpływie ważniejszych parametrów kształtowania (tj. kąta wzniosu γ , kąta kształtującego α) na jakość wykonania elementów uzyskanych z wsadów drażonych o różnej

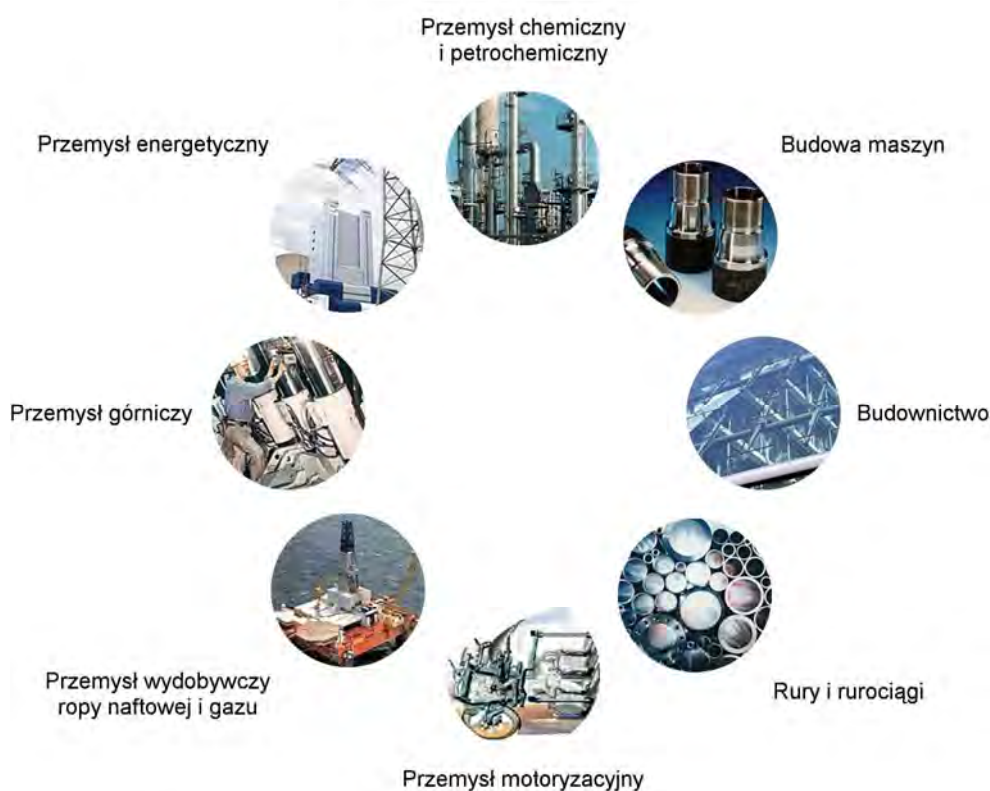
grubości ścianki. Wybrane przypadki kształtowania zweryfikowano w próbach przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Prace badawcze wykonano dla różnych materiałów konstrukcyjnych, tj.: stali (w gatunkach C45 i R35), stopu tytanu Ti6Al4V oraz stopu aluminium PA 38.

Podjęcie tej tematyki badań uznano za stosowne, ponieważ uzyskana wiedza pozwoli na wykorzystanie technologii obciskania obrotowego w warunkach przemysłowych. W końcowej części opracowania przedstawiono propozycje zastosowania metody obciskania obrotowego do wykonania wybranych elementów drążonych.

2. Analiza stanu zagadnienia

Głównym priorytetem produkcyjnym odnotowywanym w ostatnich latach w różnych gałęziach przemysłu jest obniżanie masy konstrukcji. W efekcie takiego podejścia elementy pełne są zastępowane przez odpowiedniki drążone, których udział w budowie maszyn stopniowo wzrasta.

Podstawowe dziedziny techniki, w których stosowane są elementy tego typu pokazano na rysunku 2.1.

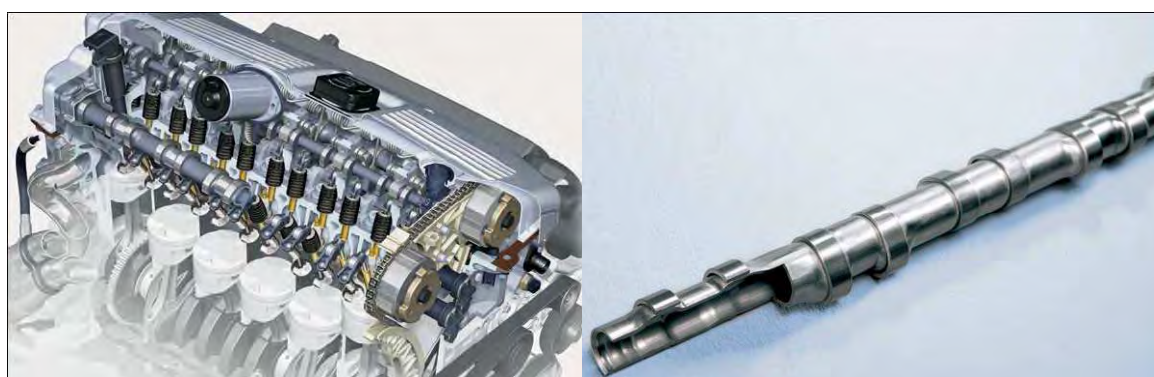


Rys. 2.1. Podstawowe obszary stosowania elementów drążonych [70]

2.1. Wyroby drążone w budowie maszyn

Analizując zagadnienia związane z produkcją wyrobów drążonych można zauważyć szybki i rozległy rozwój tej technologii wytwarzania. Głównym rynkiem zbytu, w którym jest zapotrzebowanie na części drążone w budowie maszyn jest przemysł motoryzacyjny. Ciągły rozwój wymusza tam wprowadzanie

nowych technologii wytwórczych, które jednocześnie spełniają wymogi konkurencyjności [48]. Stosowanie elementów drażonych pozwala na zmniejszenie masy konstrukcji, co w efekcie przekłada się na poprawę dynamiki pojazdów, a w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa i ograniczenia emisji zanieczyszczeń. Jednym z częstych rozwiązań jest stosowanie drażonych wałków rozrządu (rys. 2.2). Jest ono obecnie wykorzystywane w wielu silnikach samochodów osobowych, między innymi w grupie General Motors [63], czy BMW [55]. Rozwiązanie to obniża masę części o ponad 50% oraz poprawia wydajność.



Rys. 2.2. Silnik z zastosowanym w nim drażonym wałkiem rozrządu [32]

Kolejnymi elementami zasługującymi na uwagę są drażone zawory silnikowe, uzyskane w wyniku prac badawczych prowadzonych przez badaczy japońskich [20]. Wytwarzanie realizowane jest przez wytłaczanie, w trakcie którego ma miejsce także wewnętrzne prasowanie oraz kalibrowanie trzonu (rys. 2.3).

Światowy rynek motoryzacyjny kształtuje popyt na nowoczesne technologie produkcyjne. Przedstawiciele GKN Automotive A.G. z Niemiec [13] podają, iż globalna produkcja samochodów przekroczyła granicę 40 milionów sztuk już w 1995 roku. Zakładając, że w każdym samochodzie jest minimum dwie półosie napędowe (w niektórych pojazdach są cztery półosie przekazujące napęd na cztery koła) to przemysł samochodów osobowych może potrzebować w ciągu

roku minimum 80 milionów elementów drążonych tylko tego typu. W przypadku pojazdów z napędem na cztery koła, niezbędne jest przekazanie napędu do drugiej osi poprzez wał napędowy o konstrukcji dzielonej, z uwzględnieniem instalacji układu różnicowego między osiami. Przykładem takiego rozwiązania może być układ napędowy „quattro” (rys. 2.4), zastosowany w samochodach marki Audi.



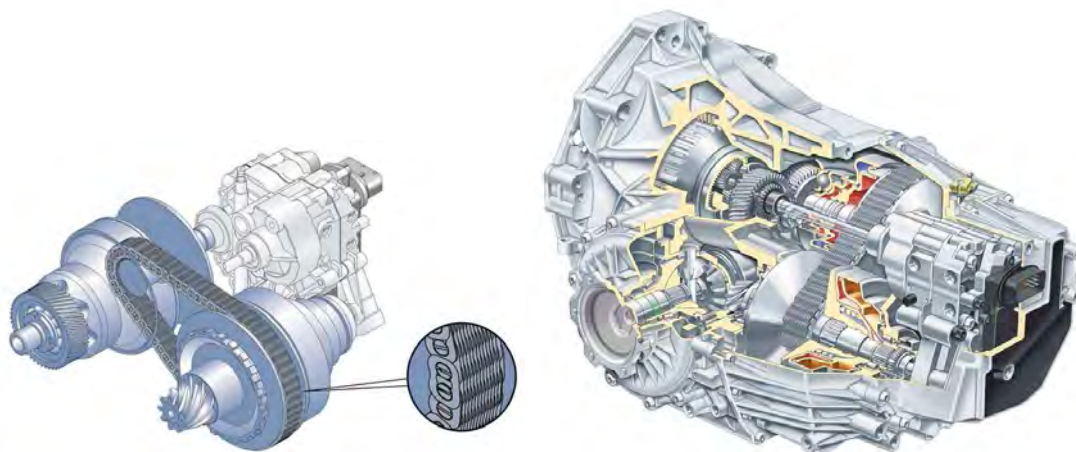
Rys. 2.3. Etapy wytwarzania zaworów drążonych [20]



Rys. 2.4. Układ napędowy typu „quattro” na cztery koła [52]

Następnymi wyrobami, w których elementy drążone znalazły zastosowanie są przekładnie napędowe. Zmniejszając ich gabaryty podnoszony jest jednocześnie przekazywany zakres mocy. W wyniku skracania czasu reakcji przekładni na zmieniające się obciążenia i obroty, wzrastają obciążenia dynamiczne we współpracujących ze sobą elementach. Przekładnia, w której zastosowano elementy drążone to między innymi automatyczna bezstopniowa

skrzynia biegów „multitronik” pokazana na rysunku 2.5. Nie posiada ona ustalonych biegów oraz przekazuje na koła maksymalny moment obrotowy w całym zakresie obrotów silnika.



Rys. 2.5. Automatyczna bezstopniowa skrzynia biegów „multitronik” [53]

Drugim przykładem przekładni napędowej może być skrzynia biegów DSG (Direct Shift Gear – z biegami zmienianymi bezpośrednio), składająca się z dwóch mechanicznych skrzyń biegów, posiadających po trzy przełożenia, co pokazano na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Dwusprzęgłowa skrzynia biegów DSG [71]

Ograniczenia masy konstrukcji i zużycia paliwa mają jeszcze większe znaczenie w przemyśle lotniczym, w wyniku czego uzyskiwane efekty ekonomiczne oraz ekologiczne są bardziej znaczące. Osiowo-symetryczne elementy drążone znajdują zastosowanie w przekładniach prostych i kątowych, służących np. do napędu skrzydłowych klap sterujących, czy też pomp paliwowych (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Przekładnie stosowane w przemyśle lotniczym [57]

Elementy drążone (niekiedy o złożonym kształcie) znajdują również zastosowanie w ażurowych konstrukcjach lotniczych struktur nośnych. Zastępowanie nimi elementów obrabianych mechanicznie, może zapobiec tworzeniu się sztywnych i ostrych krawędzi powstałych w wyniku katastrofy, które są zagrożeniem krytycznym dla podzespołów samolotu lub śmigłowca, a także dla pasażerów i załogi. W celu zmniejszenia masy konstrukcji stosowane są one chętnie w łączonej budowie elementów metalowych i kompozytowych.

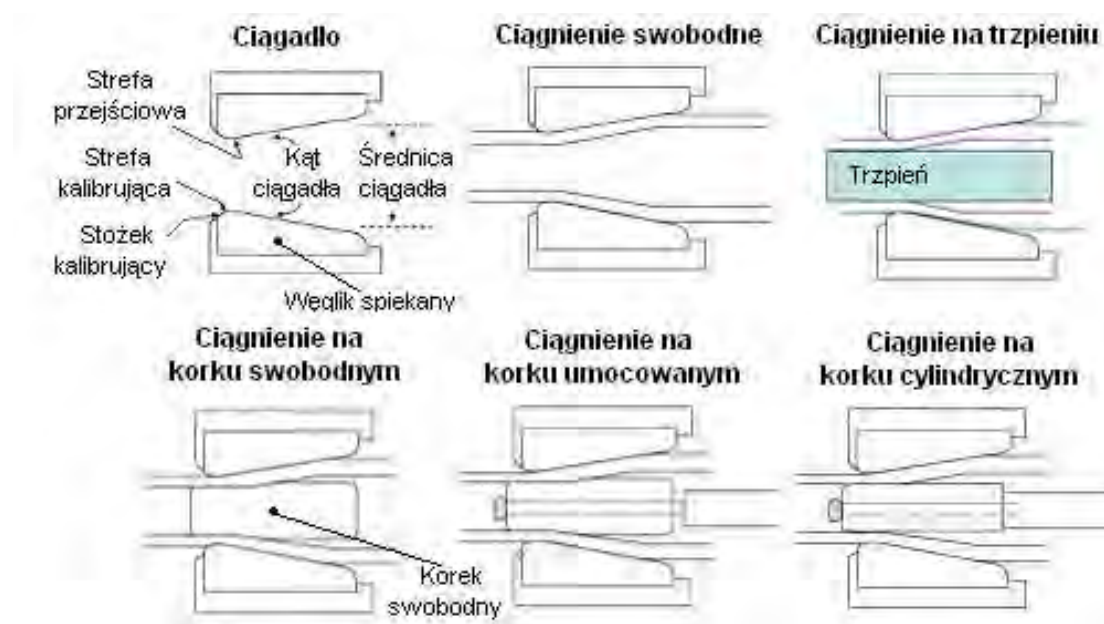
2.2. Metody wytwarzania osi i wałków drążonych

Wśród procesów kształtowania plastycznego wytwarzanie osi i wałków drążonych stanowi jedną z najtrudniejszych technologii. Dużą trudnością jest już wybór właściwej metody wytwarzania, uwzględniającej wymogi ekonomiczno-jakościowe oraz sytuację rynkową. Producent musi uwzględnić możliwe do

poniesienia nakłady inwestycyjne, wziąć pod uwagę stabilność odbioru dostaw oraz elastyczność dostosowania profilu produkcyjnego. Osie i wałki drażone mogą być wytwarzane różnymi technologiami, do których przede wszystkim zalicza się:

- ciągnienie;
- wyoblanie;
- kucie tradycyjne;
- przebijanie;
- kucie na kowarkach;
- kucie obrotowe;
- kształtowanie wysokociśnieniowe;
- wyciskanie na zimno;
- wyciskanie na zimno i głębokie wiercenie.

Na wybór technologii mają wpływ jednostkowe koszty wytworzenia, powtarzalność produkcji, zastosowanie kształtowanych wyrobów. Elementy drażone z wąskimi tolerancjami wymiarowymi kształtu i bezstopniowe, przeznaczone na wysokoobrotowe wałki maszynowe, mogą być wytwarzane przez ciągnienie. Proces ten zapewnia wysoką jakość powierzchni zewnętrznej, porównywalną z powierzchniami polerowanymi. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej obróbki cieplnej przed procesem ciągnienia, można uzyskać wyroby o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i zmęczeniowych, jednocześnie z dobrymi właściwościami plastycznymi [29]. Ze względu na zawężenie złożoności kształtu wyrobów, ograniczające się czasem do jednego kołnierza na końcu wyrobu, konieczne jest wówczas poddanie półwyrobu dalszej obróbce plastycznej, w celu uzyskania finalnego kształtu wytworzonego elementu. Na rysunku 2.8 pokazano przykładowe ciągadło oraz podstawowe metody procesu ciągnienia, wykorzystywane w produkcji elementów drażonych.



Rys. 2.8. Metody ciągnięcia elementów drążonych [69]

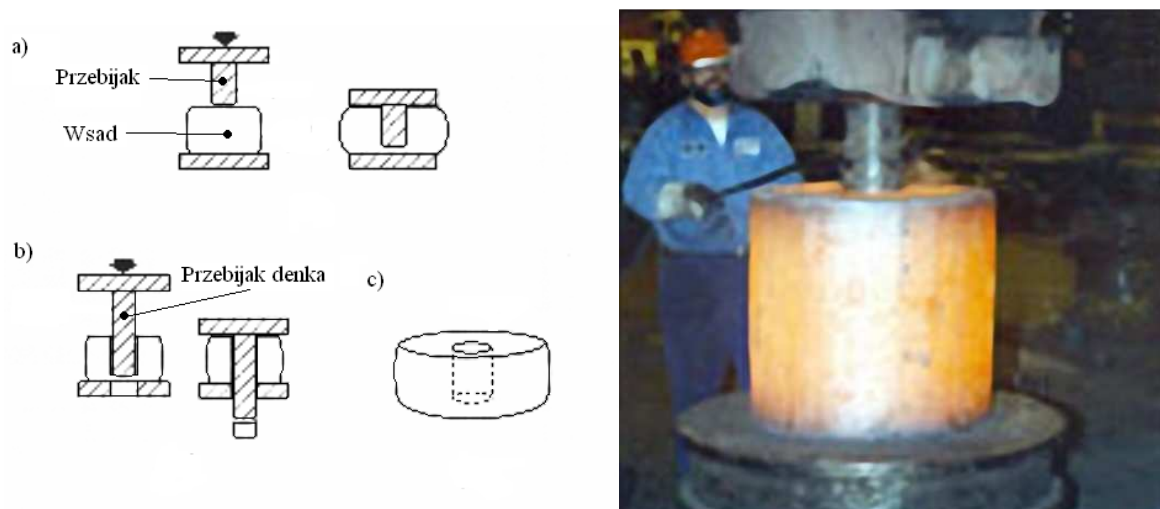
Dalszą obróbką po procesie ciągnięcia może być wyoblanie (dla wyrobów cienkościennych) lub zgniatanie obrotowe (dla wyrobów bardziej masywnych), w wyniku czego można uzyskać wyroby o bardziej złożonym kształcie. W wymienionych procesach kształtuje się osiowo-symetryczne wyroby cienkościennie (rys. 2.9). Wyroby te wykonane z dużą dokładnością, mogą być wykorzystywane w konstrukcjach lotniczych, budowie maszyn i motoryzacji [59, 61, 66, 68].

Kucie tradycyjne ma zastosowanie tylko do kształtowania wałów stosowanych w najcięższych maszynach i pojazdach. W metodzie tej konieczne jest przyjmowanie stosunkowo dużych naddatków technologicznych na dalszą obróbkę i z tego powodu technologia ta zastępowana jest przez nowocześniejsze metody wytwórcze (kucie na kowarkach i kucie obrotowe), które są znacznie korzystniejsze ekonomicznie i jakościowo. W przypadku wyrobów grubościennych i stosunkowo krótkich jest często stosowana technologia przebijania.



Rys. 2.9. Przykładowe elementy maszyn uzyskane w procesie wyoblania i zgniatania obrotowego [66]

Metodą przebijania można wykonywać przedkuwkę przeznaczoną do kształtowania innymi technologiami. W trakcie procesu rośnie siła kształtowania, która może skutkować wyboczeniem przebijaka. Na rysunku 2.10 pokazano przykładowy przebieg procesu przebijania.



Rys. 2.10. Proces przebijania; a) przebijanie, b) wycinanie denka, c) przedkuwka przeznaczona do dalszej obróbki [19, 62]

Z gotowej przedkuwki może być kształtowany wał drążony, kuciem na trzpieniu (rys. 2.11). Niestety procesy te zaliczane do kucia swobodnego, mają dość szerokie tolerancje wymiarowe.



Rys. 2.11. Proces kucia wału drążonego [62]

Proces kucia na kowarkach to metoda, pozwalająca na kształtowanie wałków poprzez redukcję średnic. Obróbka ta umożliwia zachowanie ścisłych tolerancji wymiarowych oraz korzystne płynięcie warstwy kształtowanej metalu. Dodatkowo technologia ta pozwala uzyskać wysoką jakość powierzchni wyrobu, jednocześnie utwardzonej (dla kucia na zimno). Podnosi to własności mechaniczne i wytrzymałość zmęczeniową wyrobu. Elementy drążone kształtowane na kowarkach mogą uzyskać duże wartości pochyłeń oraz znaczną redukcję średnic. Przy zastosowaniu dodatkowego trzpienia mogą być wykonywane w procesie kowarkowym otwory cylindryczne, stożkowe i profilowe. Przykładowe wałki drążone stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, wytwarzane w procesie kucia na kowarkach, pokazano na rysunku 2.12.

W procesie kucia obrotowego (rys. 2.13) obracany jest kształtowany materiał, w odróżnieniu od kucia na kowarkach, gdzie obracają się narzędzia. W metodzie tej możliwe jest wytwarzanie wyrobów o przekroju poprzecznym okrągłym jak i kwadratowym, przy zmianie profilu wzdłużnego.



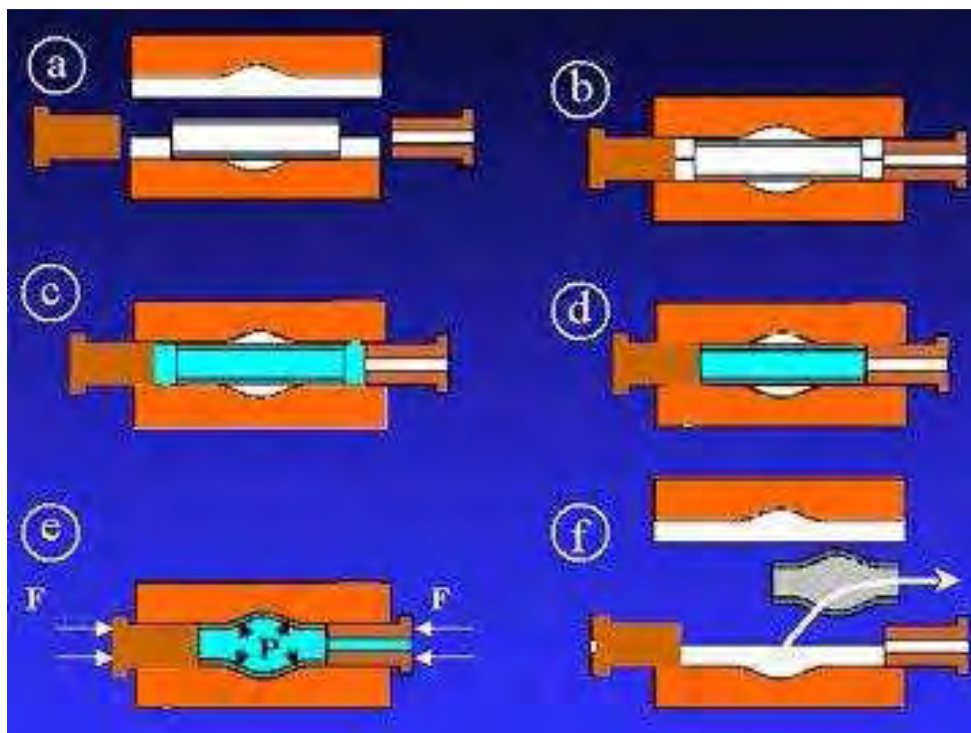
Rys. 2.12. Wałki drążone wykonane w procesie kowarkowym [65]

W procesie tym dokładność wymiarowa kształtowanych wyrobów jest o 30% ÷ 50% większa w porównaniu do kucia tradycyjnego (swobodnego), a tolerancje wymiarowe zawierają się nawet w dziesiątych częściach milimetra [24]. Przystosowanie tej technologii kucia do większości pras korbowych jest niewątpliwie jej zaletą, w efekcie poniesienia względnie niskich nakładów finansowych w przystosowaniu maszyny do produkcji.



Rys. 2.13. Proces kucia obrotowego [24]

Kolejną metodą kształtowania elementów drążonych jest wytłaczanie hydrostatyczne lub hydromechaniczne (rys. 2.14). W metodzie tej wyrób kształtowany jest pod wpływem wysokiego ciśnienia działającego na wewnętrzne ścianki tłoczonego elementu, którego zewnętrzna powierzchnia jest odwzorowaniem wykroju matrycy. Na rysunku 2.14 pokazano kolejne etapy procesu wytłaczania hydrostatycznego; a) umieszczenie wsadu w matrycach, b) zamknięcie matryc, c) uszczelnianie i napełnianie cieczą, d) zwiększanie ciśnienia wewnątrz kształtowanego wyrobu, e) kształtowanie – zewnętrzne powierzchnie tłoczonego elementu otrzymują kształt powierzchni wewnętrznej matryc, f) usunięcie gotowego wyrobu z matryc.



Rys. 2.14. Etapy procesu wytłaczania hydrostatycznego (opis w tekście) [51]

Proces ten umożliwia wykonywanie elementów o kształtach złożonych. Najważniejszym parametrem procesu jest stosunek średnicy do grubości ścianki, który charakteryzuje możliwość zastosowania kształtowania wysokociśnieniowego. Wyroby wytwarzane tą metodą mogą mieć przejścia wykonane z promieniami minimalnymi równymi $1,5 g$ (g – grubość ścianki) oraz

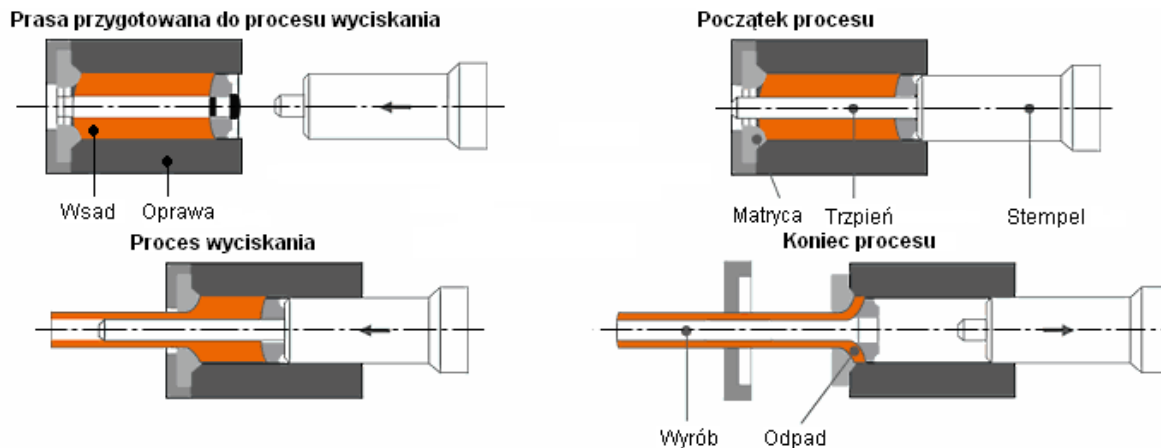
mają tolerancje wytwórcze mieszczące się w 10 – 14 klasie dokładności [23]. Niekiedy metodą tą wykonywane są wałki rozrządu. Technologia ta wykorzystywana jest do produkcji elementów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym, między innymi takich jak: części zawieszeń samochodowych (wahacze, belka tylnego zawieszenia), elementy strukturalne drzwi, ramy foteli, układy wydechowe oraz różnego typu wzmocnienia (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Wyroby wykonane w procesie kształtowania hydrostatycznego [69]

W celu uniknięcia dodatkowych procesów technologicznych takich jak końcowa obróbka cieplna oraz zmniejszenia naddatków na obróbkę mechaniczną, większość wałków do skrzyń biegów obecnie wykonywana jest technologiami obróbki plastycznej na zimno. Znaczną przewagę metoda ta ma nad procesami przebiegającymi na gorąco w przypadku dużych serii. Proces wyciskania na zimno w połączeniu ze zgrzewaniem tarciovym lub z głębokim wierceniem zwiększa zakres stosowania tej metody wytwarzania. Na rysunku 2.16 podano schemat procesu wyciskania.

Na uwagę zasługuje również technologia walcowania poprzeczno-klinowego (WPK), która ma ugruntowaną pozycję przy wytwarzaniu w przemyśle wałków wielostopniowych i innych elementów osiowo-symetrycznych o przekroju pełnym. Natomiast wytwarzanie elementów drażonych nie jest jeszcze tak rozpowszechnione.

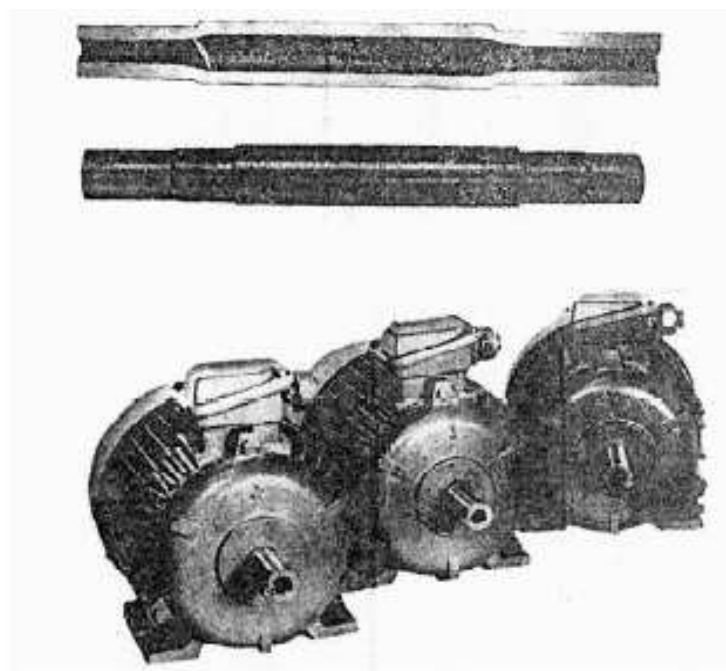


Rys. 2.16. Proces wyciskania na zimno [67]

Na temat wykorzystania tej technologii do walcowania wyrobów drążonych można wnioskować na podstawie analizy literatury specjalistycznej. Pierwsze wzmianki ukazały się w literaturze rosyjsko – języcznej [6, 15, 21, 45, 46]. W pracy [6] przedstawiono rezultaty badań doświadczalnych, w wyniku których zaproponowano wytwarzanie metodą WPK wałków drążonych do silników elektrycznych (rys. 2.17). Natomiast w pracach [21, 46] w sposób bardzo ogólny przedstawiono, proces kształtowania kołnierzy oraz zakończeń rur. Nie zostały tam jednak podane informacje o uzyskanych dokładnościach wymiarowych, jak również wytycznych pozwalających na dobór parametrów procesu WPK, pozwalających na uzyskanie wyrobów z zakładaną dokładnością.

W szerokim zakresie badania technologii WPK wyrobów drążonych przedstawiono w pracy [4], w której analizowano procesy WPK klinami płaskimi o kątach kształtujących $\alpha = 20^\circ \div 40^\circ$ oraz kątach rozwarcia klina $\beta = 6^\circ \div 10^\circ$, przy stopniach gniotu δ wynoszących: 1,15; 1,25; 1,36 oraz 1,5. Przykładowe próbki otrzymane w próbach walcowania pokazano na rysunku 2.18. Analizie poddano różne kombinacje zastosowania wyszczególnionych powyżej parametrów, w celu określenia ich wpływu na stabilność procesu i jakość wykonanych wyrobów. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stabilność procesu WPK wyrobów drążonych może być zakłócona w wyniku:

- niekontrolowanego poślizgu, doprowadzającego czasami do zgniecenia wyrobu;
- przewężenia kształtowanego stopnia odkuwki;
- deformacji powierzchni wewnętrznej wyrobu.



Rys. 2.17. Wałki drążone, wytwarzane metodą WPK, stosowane w silnikach elektrycznych [6]



Rys. 2.18. Przykłady próbek drążonych wykonanych z ołowiu w gatunku Pb 1, odkształconych w procesie WPK [4]

Stwierdzono, że najkorzystniejsze jest stosowanie narzędzi z kątami $\alpha = 30^\circ$ i $\beta = 6^\circ \div 8^\circ$. Parametry te zapewniają prawidłowe wykonanie wałka drążonego dla prawie wszystkich stosowanych stopni gniotu. W celu uniknięcia zniekształcenia

powierzchni wewnętrznej, zaproponowano stosowanie klinów, których kąty spełniają następującą nierówność:

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \leq 0,11. \quad (2.1)$$

Zauważono przy tym, że projektowanie procesu WPK wyrobów drążonych powinno opierać się przede wszystkim na analizie numerycznej przeprowadzanej metodą elementów skończonych.

W katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej wykonano także prace badawcze dotyczące kształtowania metodą WPK drążonego korpusu noża obrotowego. Noże te stosowane są głównie w przemyśle wydobywczym, jak również podczas remontowania nawierzchni dróg. Przykłady noży pokazano na rysunku 2.19.



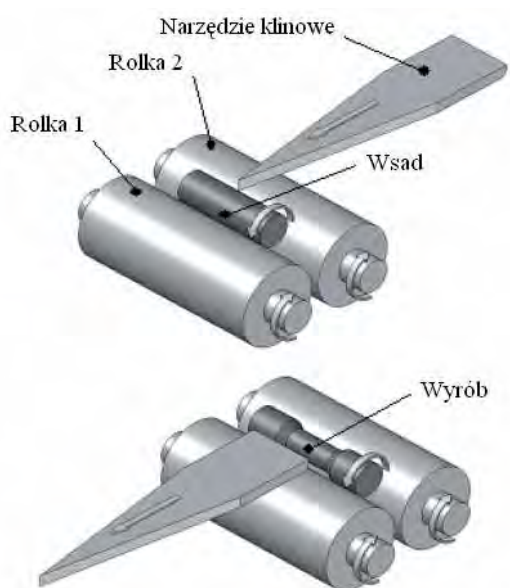
Rys. 2.19. Przykład noży obrotowych [64]

W ramach prac badawczych wykonano próby walcowania korpusu noża ze wsadów rurowych o różnej grubości ścianki (średnice wewnętrzne dobrano jako $\varnothing 28,8$; $\varnothing 24,0$; $\varnothing 19,2$; $\varnothing 14,4$ mm) i z wsadu pełnego. Przeprowadzono obliczenia numeryczne, a następnie zweryfikowano je próbami w warunkach

przemysłowych [43]. Wyrób ze wsadu o najcieńszej ścianie nie uzyskał zakładanego kształtu, w trakcie procesu wystąpił poślizg prowadzący do zniekształcenia odkuwki. Pozostałe wyroby wykonane były z niezadowalającą dokładnością szczególnie w części chwytowej. Wynik prac potwierdził fakt, iż nie można wykorzystywać narzędzi zaprojektowanych do realizacji procesów WPK wyrobów pełnych do kształtowania odkuwek drażonych. Ponowna analiza procesu walcowania, w którym zastosowano narzędzia projektowane w sposób uwzględniający specyfikę kształtowania wyrobów drażonych wykazała, że drażone noże obrotowe powinny być wytwarzane z zakładaną do uzyskania dokładnością [4].

2.3. Walcowanie klinowo-rolkowe

Proces walcowania klinowo-rolkowego (WKR) jest odmianą walcowania poprzeczno-klinowego (WPK). W celu obniżenia kosztów narzędzi, w metodzie tej wykorzystuje się jeden klin płaski oraz dwie rolki. Rolki te utrzymują wyrób we właściwej pozycji i wspomagają jego obrót w trakcie procesu kształtowania (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Schemat ideowy technologii kształtowania metodą walcowania klinowo-rolkowego [41]

Koncepcja tej technologii wytwarzania powstała w Katedrze Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.

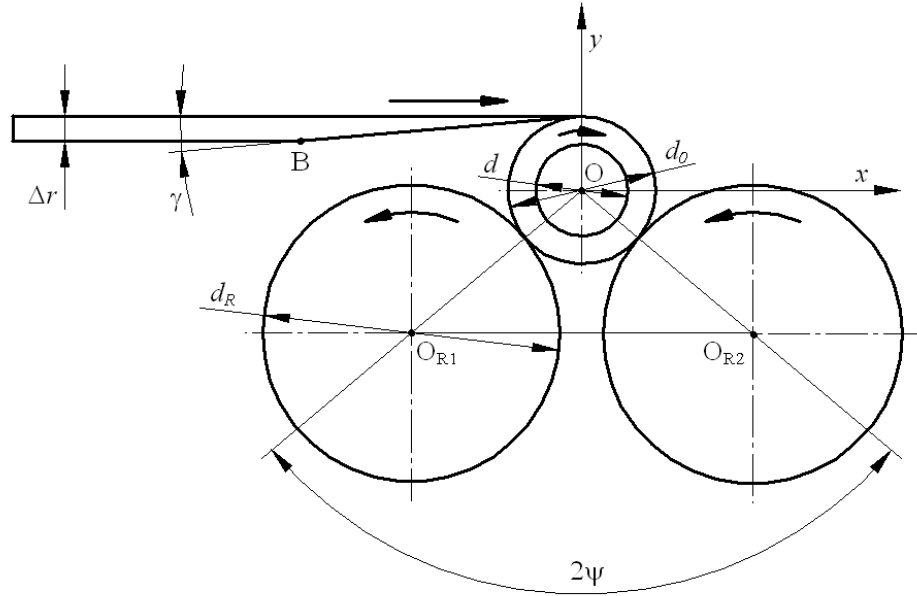
Metoda walcowania klinowo-rolkowego w porównaniu do dotychczas stosowanych procesów WPK posiada szereg zalet. Najistotniejsze z nich to:

- a. niższe koszty wdrożeniowe – stosowany jest tylko jeden klin;
- b. mniejsze prawdopodobieństwo tworzenia pęknięć wewnętrznych w kształtowanym wyrobie;
- c. możliwość zwiększenia wydajności procesu, poprzez kształtowanie kilku wyrobów jednocześnie (rys. 2.21);
- d. samoistne usuwanie zgorzeliny.



Rys. 2.21. Proces walcowania klinowo-rolkowego kilku wyrobów [41]

Opracowane dotychczas schematy procesu WKR oraz wyniki ich badań zostały szczegółowo opisane w monografii [38]. Pater przeanalizował procesy WKR z zastosowaniem dwóch typów rolek (gładkich i profilowych). Proces walcowania na rolkach gładkich pokazano schematycznie na rys. 2.22, na którym zaznaczono również ważniejsze parametry geometryczne.



Rys. 2.22. Schemat procesu WKR realizowanego z zastosowaniem rolek gładkich [38]

W powyższym schemacie założono jednakową średnicę zewnętrzną rolek d_R , które rozmieszczone są symetrycznie względem płaszczyzny przechodzącej przez oś wsadu i prostopadłej do płaszczyzny przebiegającej przez osie rolek. Dodatkowo założono, że położenie rolek określone będzie przez kąt rozstawu rolki ψ . Aby rolki nie stykały się między sobą kąt ψ nie może być mniejszy od wartości granicznej, obliczonej na podstawie następującego równania:

$$\psi_{\min} = \arcsin \frac{\xi}{1 + \xi}, \quad (2.2)$$

gdzie: $\xi = d_R/d_0$.

Wartość kąta ψ jest również ograniczona od góry. Zbyt duże wartości ψ mogą spowodować zetknięcie rolek z klinem. Niebezpieczeństwu temu zapobiega stosowanie kątów rozstawu mniejszych od:

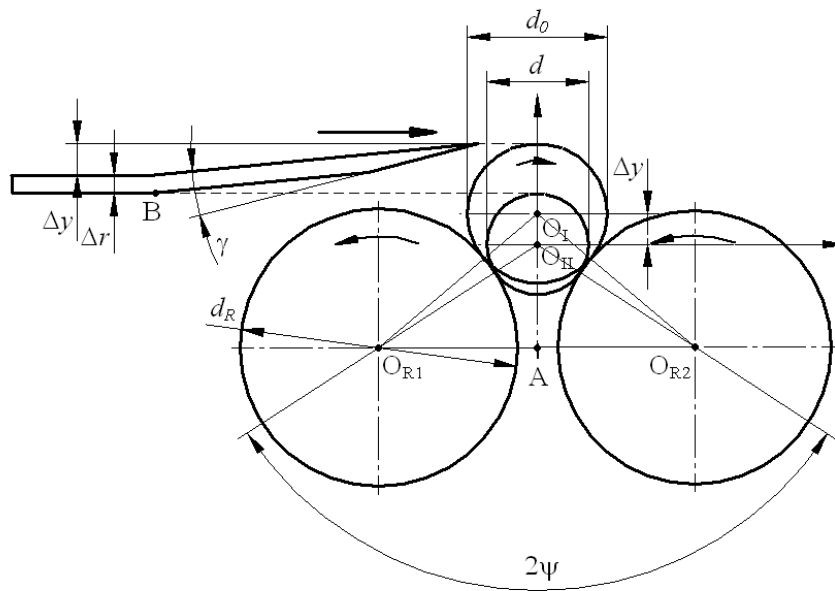
$$\psi_{\max} = \arccos \frac{\xi - \frac{1}{\delta}}{1 + \xi}, \quad (2.3)$$

gdzie: $\delta = d_0/d$ – stopień gniotu.

Dla przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego określonego przez d_R i ψ , konieczna jest znajomość maksymalnej wartości stopnia gniotu, który można osiągnąć przy takich parametrach kształtowania. Wartość ta wynosi:

$$\delta_{\max} = \frac{1}{\xi - (1 + \xi)\cos\psi}. \quad (2.4)$$

Drugą odmianą procesu WKR jest kształtowanie na rolkach profilowych (rys. 2.23). W procesie tym podczas kształtowania następuje dodatkowe przesunięcie pionowe odkuwki o wartość Δy , spowodowane wciskaniem jej w występy rolek, odwzorowujących kształt walcowanego przewężenia.



Rys. 2.23. Schemat procesu WKR realizowanego z zastosowaniem rolek profilowych [38]

W schemacie pokazanym na rys. 2.23, wartość kąta $\psi_{\min}$ określona jest z zależności (2.2), natomiast kąt $\psi_{\max}$ można obliczyć rozpatrując sytuację końcową procesu walcowania, dla której:

$$\psi_{\max} = \arccos \frac{\xi\delta - 1}{1 + \xi\delta}. \quad (2.5)$$

Maksymalna wartość stopnia gniotu możliwego do uzyskania w tej odmianie walcowania klinowo rolkowego wynosi:

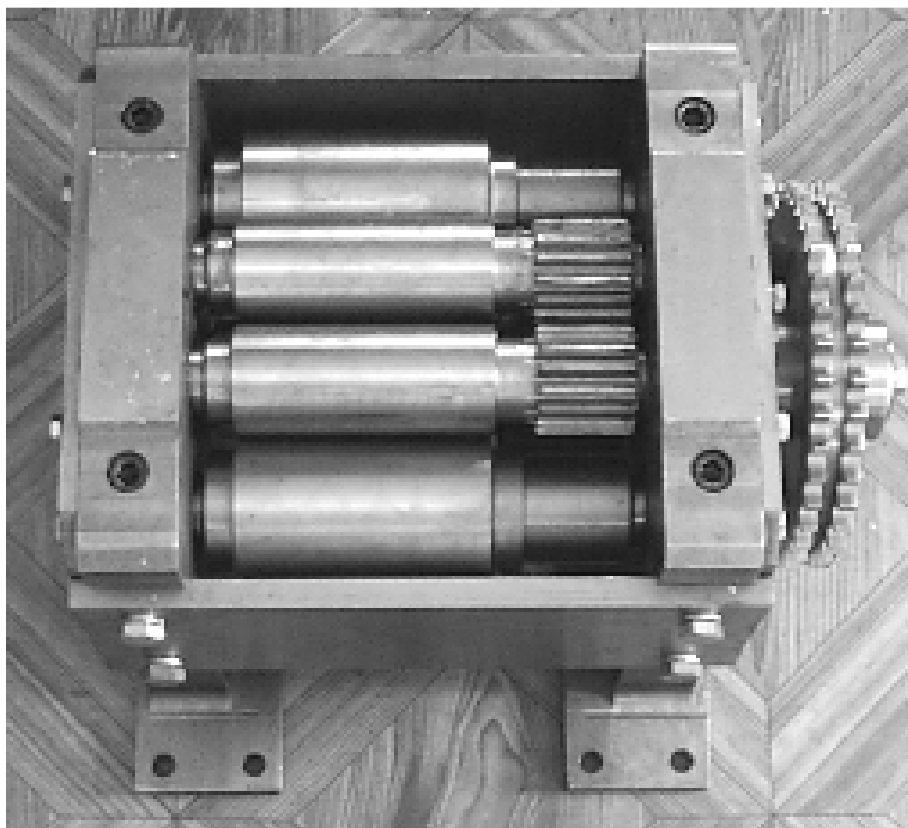
$$\delta_{\max} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{1 + \cos \psi}{1 - \cos \psi}. \quad (2.6)$$

Badania doświadczalne WKR wykonano w walcarce laboratoryjnej LUW-2, pokazanej na rysunku 2.24, składającej się z: korpusu, suwaka górnego, przekładni rolkowej i układu napędowego. Agregat ten (zaprojektowany w całości w programie CAD Solid Edge v9) po przebrojeniu może być wykorzystywany do prowadzenia procesów walcowania poprzeczno-klinowego realizowanego w układzie dwóch (przemieszczających się przeciwbieżnie) klinów płaskich.



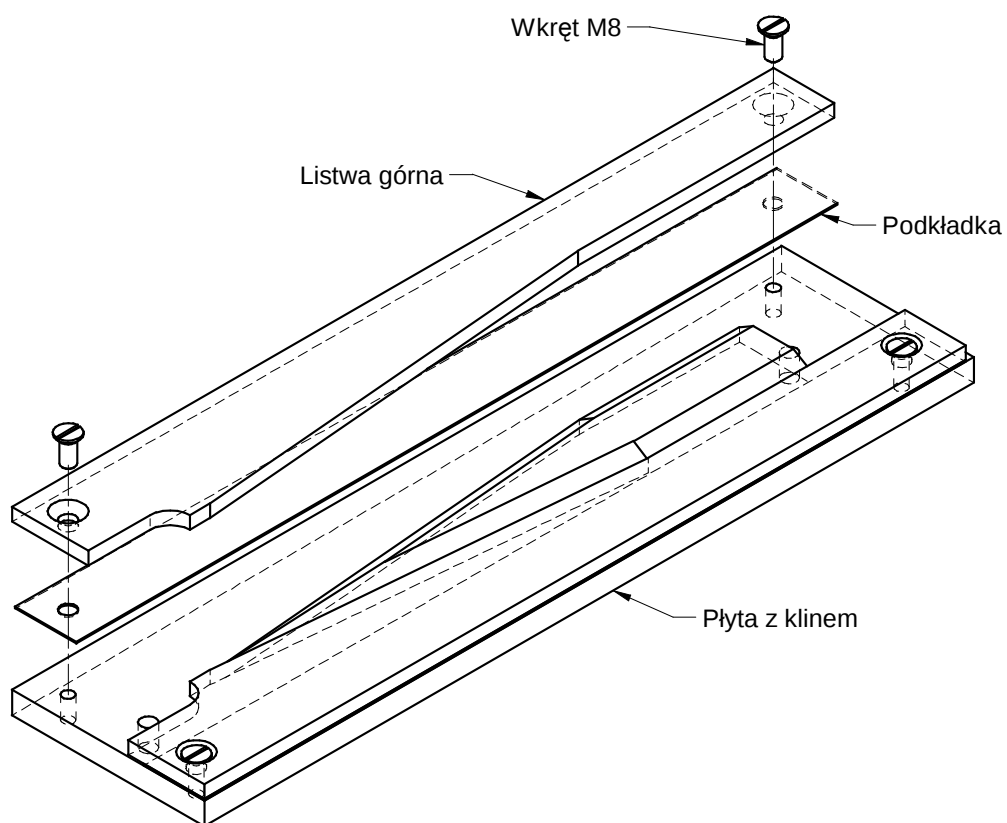
Rys. 2.24. Walcarka laboratoryjna LUW-2 przystosowana do walcowania klinowo-rolkowego [38]

W procesie WKR na stole walcarki umieszczana jest przekładnia rolkowa (rys. 2.25), która umożliwia realizację przypadków kształtowania przy siłach dochodzących do 200 kN.



Rys. 2.25. Przekładnia rolkowa montowana w walcarce LUW-2 [38]

Na kolejnym rysunku 2.26 pokazano klinowy zestaw narzędziowy wykorzystywany w realizacji procesu WKR na rolkach gładkich. Narzędzie to umożliwiało kształtowanie wg dwóch schematów, w których kontakt klina z próbką występował w strefie kształtowanego przewężenia lub na całej długości próbki. Z badań wykonanych przez Patera [38] wynika, iż zastosowanie rolek gładkich prowadzi do niepożądanego wygięcia próbek, oraz występowania klinowych nacięć pierścieniowych (rys. 2.27). Autor ten stwierdził, że metodą tą można kształtować w sposób prawidłowy tylko przewężenia o małej szerokości oraz niewielkiej głębokości (przy małym stopniu gniotu δ).

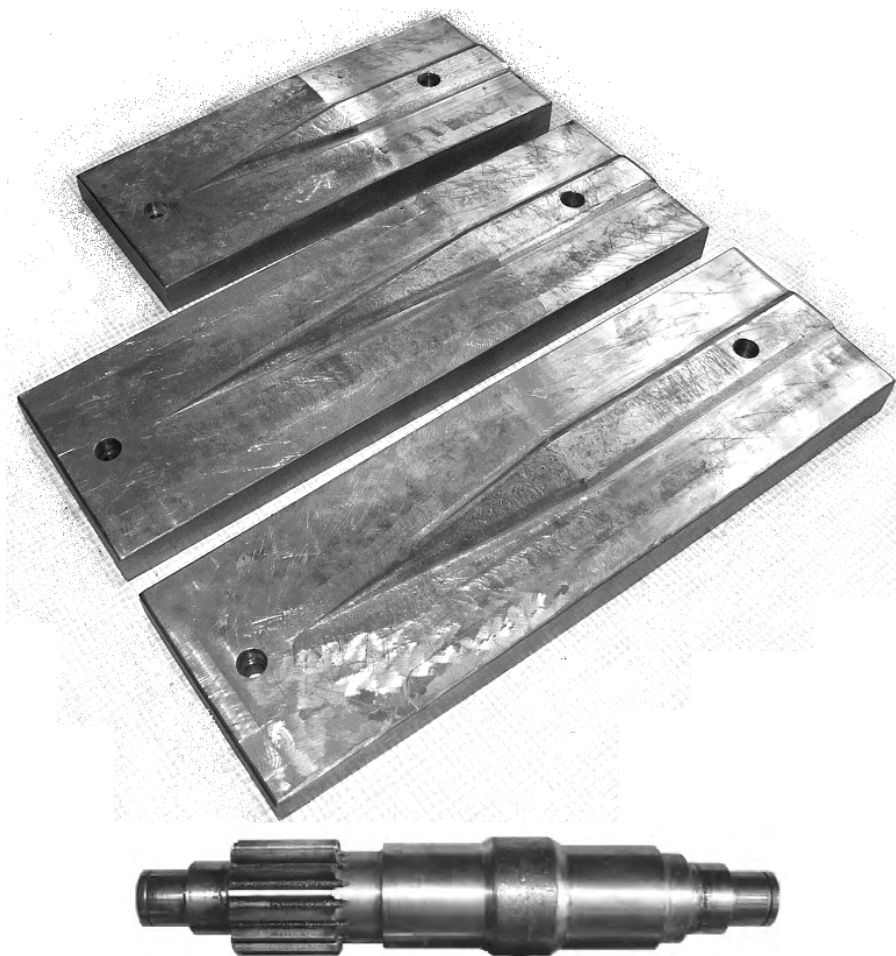


Rys. 2.26. Przykładowe narzędzie klinowe do procesu WKR na rolkach gładkich [38]



Rys. 2.27. Przykłady próbek uzyskanych w procesie WKR na rolkach gładkich [38]

W procesach WKR na rolkach profilowych stosuje się narzędzia kształtujące pokazane na rysunku 2.28. W trakcie walcowania przedmiot obrabiany przemieszcza się w dół i wciskany jest między rolki, dlatego też klin jest tak ukształtowany by uwzględnione było przesunięcie pionowe Δy odkuwki. Dla tej odmiany WKR prowadzone były badania w czterech kombinacjach kontaktu narzędzi kształtujących z wyrobem walcowanym. Najlepsze rezultaty uzyskano dla przypadku walcowania, w którym narzędzia stykały się z walcowanym przedmiotem na całej jego długości.



Rys. 2.28. Przykładowe narzędzia do procesu WKR na rolkach profilowych [38]

Pater wykonał również w stosunkowo ograniczonym zakresie badania kształtowania wyrobów drążonych metodą WKR, w trakcie których walcowano próbki drążone o różnej grubości ścianek. Przykłady próbek otrzymanych w

efekcie wykonanych prac pokazano na rys. 2.29. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że otrzymane wyroby drażone charakteryzują się dobrą dokładnością wykonania i mają względnie stałą grubość ścianki w obszarze kształtowanego przewężenia.



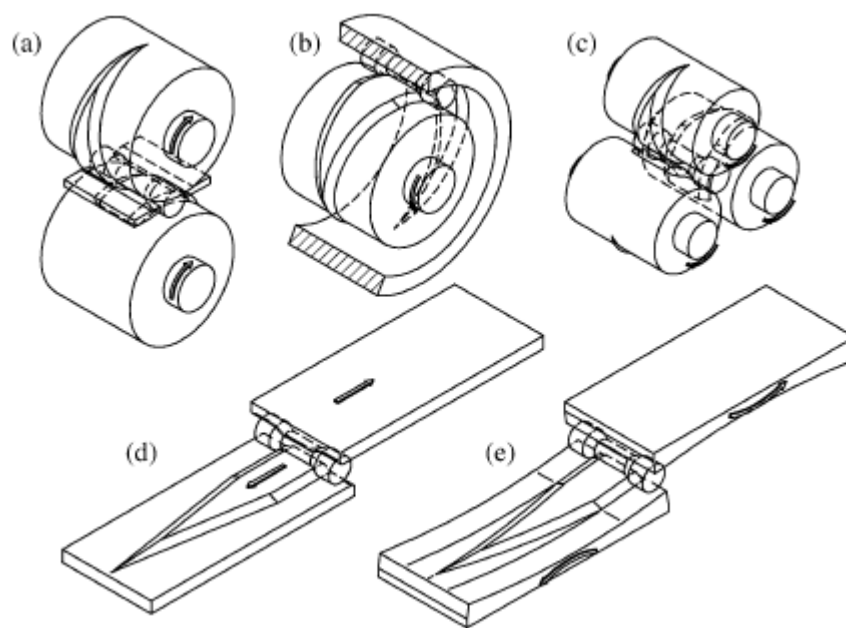
Rys. 2.29. Przykłady odkuwek ze stali C45 uzyskanych w procesie WKR [38]

2.4. Podsumowanie stanu zagadnienia

Technologia walcowania poprzeczno – klinowego znalazła obecnie szerokie zastosowanie w przemyśle [22, 40, 47, 50]. Metodą tą wytwarzane są m.in. przedkuwki osiowo – symetryczne przeznaczone do dalszej obróbki plastycznej [5, 7], wyroby walcowane na gotowo [17, 30] oraz odkuwki przeznaczone do dalszej obróbki mechanicznej [12, 16]. Metody WPK wykorzystywane są zwykle w produkcji seryjnej oraz masowej, ze względu na stosunkowo wysokie koszty zakupu parku maszynowego oraz wykonania narzędzi kształtujących [5, 18]. Proces WPK można realizować w kilku odmianach, w zależności od typu i liczby stosowanych narzędzi – rys. 2.30.

W ostatnich latach odnotowano wzrost liczby prac dotyczących wykorzystania metody WPK w produkcji wałków i osi drażonych [1 ÷ 3, 6, 14, 34, 42]. Wynika to głównie z rosnącego zainteresowania tymi elementami, ze względu

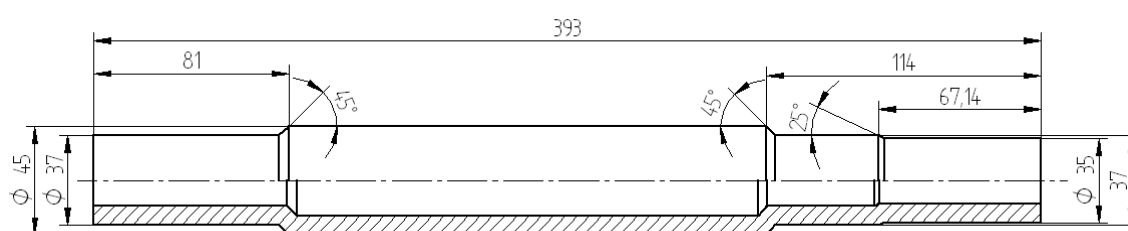
na ich wykorzystanie w przemyśle motoryzacyjnym i w budowie maszyn. W rezultacie wykonanych badań zauważono, że w procesie kształtowania dwoma narzędziami ma miejsce większa owalizacja przekroju poprzecznego, w porównaniu do procesów walcowania wyrobów pełnych. W celu usunięcia tej owalizacji należy wydłużyć strefę kalibrowania, co jednak skutkuje wzrostem kosztów wytwarzania oraz obniżeniem wydajności procesu kształtowania (spowodowane zwiększeniem długości całkowitej narzędzi).



Rys. 2.30. Metody WPK realizowanego w układzie: a) dwóch walców, b) segment wklęsły – walec, c) trzech walców, d) dwóch płaskich narzędzi klinowych, e) dwóch wklęsłych segmentów narzędziowych [44]

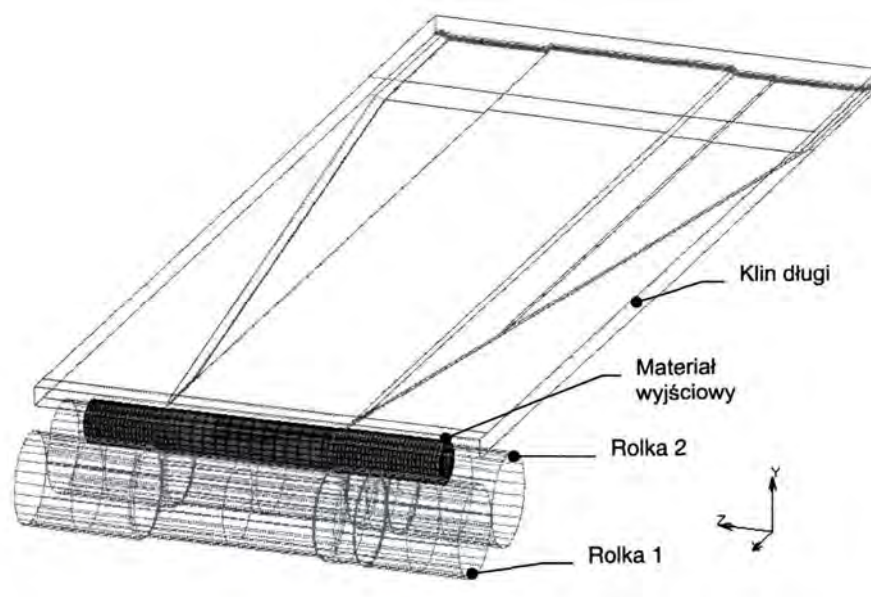
W celu obniżenia kosztów wdrożeniowych rozważono możliwość zastosowania jednego klina i dwóch rolek, proces ten nazwano walcowaniem klinowo – rolkowym (rys. 2.20) [38]. W metodzie tej wsad kształtowany jest trzema narzędziami, przez co owalizacja przekroju poprzecznego jest skuteczniej usuwana niż podczas walcowania dwoma klinami. Pozwala to na skrócenie strefy kalibrowania, a w konsekwencji zmniejsza się długość całkowita narzędzia klinowego. Rozważając możliwości metody WKR Pater wykonał analizę procesu kształtowania wałka drążonego pokazanego na rys. 2.31. W efekcie

przeprowadzonych obliczeń stwierdził on, że w trakcie kształtowania wyrobu redukcji średnicy zewnętrznej nie musi towarzyszyć wydłużenie wałka. Występuje bowiem wówczas płynięcie metalu w kierunku promieniowym, które prowadzi do zwiększenia grubości ścianki (zwiększają się także własności wytrzymałościowe wyrobu). Pater przeprowadził również analizę porównawczą dwóch procesów kształtowania, w których korzystano z różnych narzędzi, tj. klina typowego oraz narzędzia płaskiego (dwukrotnie krótszego).



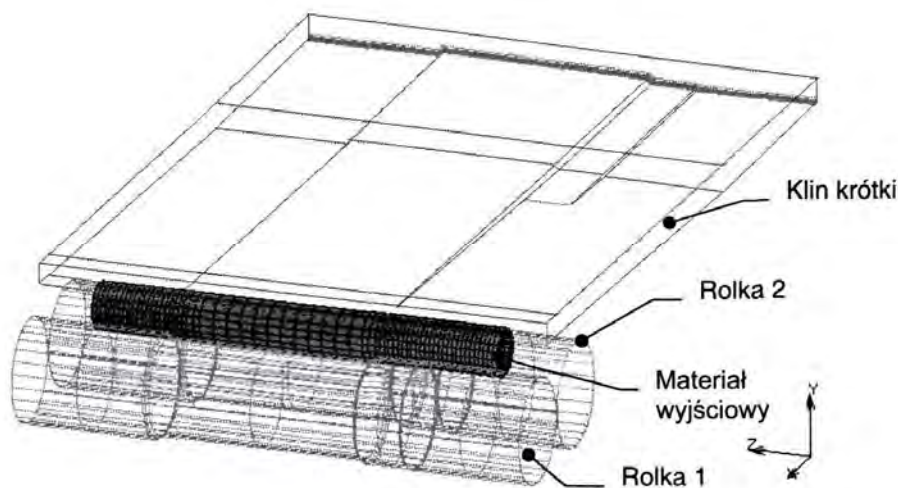
Rys. 2.31. Stopniowy wałek drążony wykorzystywany w silnikach elektrycznych [38]

Analiza ta przeprowadzona była w oparciu o obliczenia numeryczne wykonane przy pomocy programu MSC.SuperForm. Wykorzystano w nich dwa modele procesów kształtowania, pokazane na rys. 2.32 i 2.33.



Rys. 2.32. Model procesu kształtowania narzędziem długim – klinem [38]

Po przeprowadzonych obliczeniach, przeanalizowano rozkłady intensywności odkształcenia i stwierdzono, że odkształcenia maksymalne występują w czopie dłuższym w miejscu zestopniowania. W trakcie obliczeń nie dokonywano przebudowy siatki, co pozwoliło na analizę porównawczą (ilościową) obydwu przypadków walcowania. Stwierdzono także, że metal ulega stycznemu płynięciu na końcach odkuwki (świadczyło o tym skrócenie linii wzdłużnych siatek). Większe skrócenie linii odnotowano w procesie walcowania klinem długim (typowym dla WPK).



Rys. 2.33. Model procesu kształtowania narzędziem krótkim, płaskim [38]

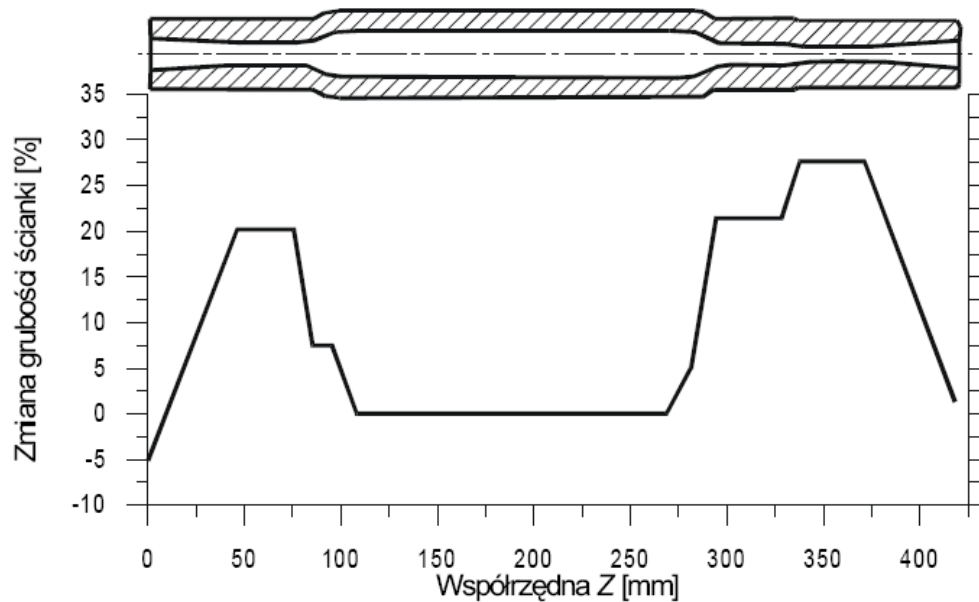
Zastosowana metoda walcowania znalazła odbicie w grubości ścianki otrzymywanej odkuwki. Uzyskane rozkłady grubości pokazano na rys. 2.34 i 2.35, odnosząc się do grubości ścianki wsadu, zgodnie z zależnością:

$$\Delta g = \frac{g - g_0}{g_0} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

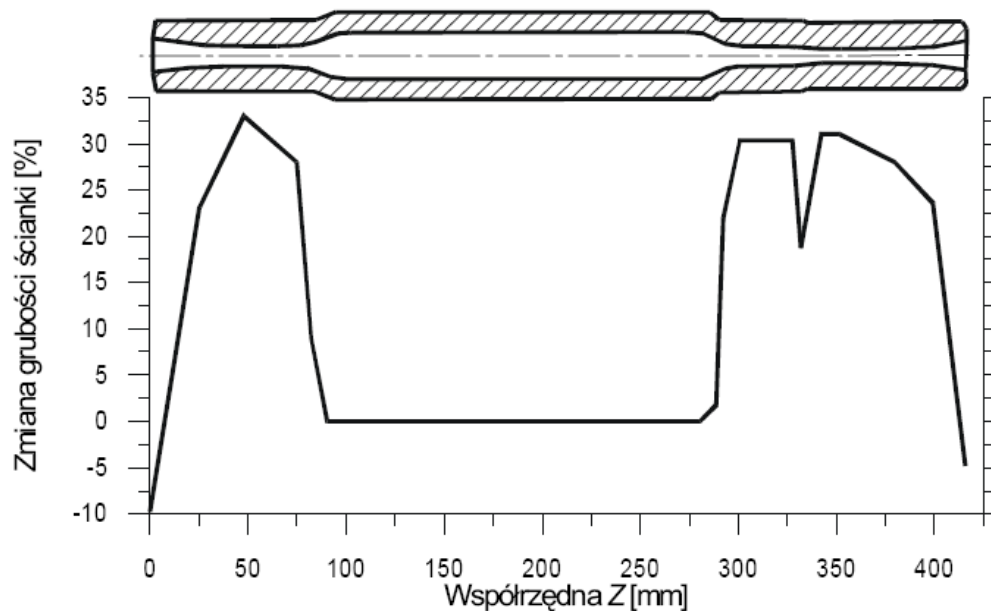
gdzie g i g_0 oznaczają grubości ścianki przed i po kształtowaniu.

Stwierdzono, że stosując obie z analizowanych metod można wykonywać wałki drażone o poprawnym kształcie. Jednak poszczególne parametry opisujące rozważone przypadki kształtowania są różne – patrz tab. 2.1. Z

przeprowadzonych obliczeń wynika, iż korzystniejszy jest proces walcowania krótszym narzędziem, który dla odróżnienia od WKR nazwano obciskaniem obrotowym.



Rys. 2.34. Zmiana grubości ścianki Δg wałka drążonego kształtowanym klinem długim [38]



Rys. 2.35. Zmiana grubości ścianki Δg wałka drążonego kształtowanym narzędziem krótkim [38]

Tablica 2.1

Ważniejsze parametry charakteryzujące analizowane procesy kształtowania wałka drążonego [38]

Parametr	Proces kształtowania narzędziem krótkim (obciskanie obrotowe)	Proces kształtowania klinem długim (WKR)
Wartość siły maksymalnej F [N]:		
• klin	278954	317169
• rolka 1	228067	247797
• rolka 2	210588	199320
Uśredniona wartość zmiany grubości ścianki [%]	22,26	15,38
Praca wykonana przez klin [J]	20491,9	33302,4
Maksymalne odkształcenie	5,05	6,42
Zakres temperatur w wyrobie, po procesie kształtowania [°C]	934,0 ÷ 1120,0	893,5 ÷ 1095,1
Szacowana wydajność [szt./godz.]	750	450

W wyniku przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia, stwierdzono, że metoda obciskania obrotowego bardzo korzystnie prezentuje się na tle procesów WKR i WPK w przypadku kształtowania odkuwek drążonych. Zatem za uzasadnione uznano podjęcie prac badawczych, na podstawie których zostaną opracowane wytyczne pozwalające na dobór parametrów procesu obciskania wyrobów drążonych. Proces taki powinien bowiem gwarantować stabilny przebieg i uzyskanie wyrobu (odkuwki) o odpowiedniej dokładności.

3. Cel, teza i zakres pracy

W pracy podjęto się analizy procesu obciskania obrotowego wyrobów ze stali (niestopowej konstrukcyjnej w gatunku C45 oraz przeznaczonej do produkcji rur gatunku R35), stopu tytanu Ti6Al4V oraz stopu aluminium PA 38. Założono, że badania analizowanego procesu będą obejmowały analizę teoretyczną bazującą na metodzie elementów skończonych (MES) oraz weryfikację doświadczalną przeprowadzoną w warunkach laboratoryjnych. W pierwszym etapie pracy zostanie opracowany schemat procesu obciskania obrotowego, na podstawie którego wyprowadzone zostaną zależności pozwalające na odpowiedni dobór parametrów narzędzi spełniające ograniczenia geometryczne. Następnie zostanie zaprojektowany model MES, który umożliwi przeprowadzenie symulacji numerycznych analizowanego procesu. Obliczenia numeryczne pozwolą określić parametry gwarantujące stabilny przebieg procesu obciskania obrotowego. Weryfikacja doświadczalna będzie obejmować wybrane przykłady analizowanego procesu obejmujące niektóre zmiany głównych parametrów procesu.

Opracowany model MES powinien umożliwić:

- uwzględnienie umiejscowienia strefy kształtowanej w odkuwce;
- uwzględnienie zmiany głównych parametrów procesu;
- uwzględnienie zjawisk ograniczających stabilność realizowanego procesu obciskania obrotowego: niekontrolowany poślizg, zgniecenie odkuwki;
- prognozowanie kształtu otrzymanego wyrobu;
- prognozowanie wartości sił w miejscu kontaktu materiał-narzędzia kształtujące;
- ujęcie kinematyki ruchu narzędzi;
- uwzględnienie wielkości odkształcenia plastycznego.

Na podstawie wstępnych badań [31], dotyczących wpływu głównych parametrów analizowanego procesu na jego przebieg oraz przeprowadzonego przeglądu literaturowego sformułowano następującą tezę pracy:

W procesie obciskania obrotowego można kształtować osiowo-symetryczne wyroby drażone, mające ścianki o grubości większej od grubości wsadu (rury), z dokładnością właściwą dla procesów walcowania poprzeczno-klinowego, realizowanego w warunkach obróbki plastycznej na gorąco.

Dla wykazania słuszności tezy zaplanowano szereg prac badawczych, zarówno teoretycznych jak i prowadzonych w warunkach laboratoryjnych.

Wykonana analiza teoretyczna obejmowała symulacje numeryczne przebiegu procesów kształtowania wyrobów drażonych, ujmujące dwa przypadki usytuowania strefy kształtowania w wyrobie, to jest: w jego centrum oraz na końcach. Zbadano wpływ kąta wzniosu γ powierzchni kształtującej szczęki górnej, kąta kształtującego α oraz stopnia gniotu δ na dokładność wykonania kształtowanych wyrobów i zmianę grubości ścianki. Obliczenia numeryczne pozwoliły na wyznaczenie rozkładów intensywności odkształceń plastycznych oraz sił działających na powierzchnię styku materiał-narzędzie. Weryfikację obliczeń numerycznych procesu obciskania obrotowego wykonano na walcarce laboratoryjnej LUW – 2, gdzie zbadano wpływ kąta wzniosu γ na przebieg procesu kształtowania próbek wykonanych z wsadów z różnych materiałów i o różnych grubościach ścianki g_0 . Dokonano pomiaru kształtu otrzymanych próbek w celu określenia wielkości owalizacji oraz rozkładu zmiany grubości ścianki.

Analizę teoretyczną procesu obciskania obrotowego wykonano w oparciu o symulacje numeryczne bazujące na MES. W trakcie obliczeń zmieniano główne parametry procesu, do których zaliczono:

- kąt pochylenia powierzchni bocznej α , w zakresie $20^\circ \div 45^\circ$;
- kąt wzniosu powierzchni kształtującej γ w przedziale $1^\circ 30' \div 3^\circ 30'$;

- stopień gniotu δ od 1,19 do 1,39.

Następnie wykonano weryfikację doświadczalną na walcierce laboratoryjnej LUW-2. Przedmiotem badań doświadczalnych były próbki drążone o wymiarach $\varnothing 25 \times 80$ mm i różnych grubościach ścianek g_0 . Próbki kształtowano w ich części centralnej. W próbach doświadczalnych badano wpływ następujących parametrów procesu:

- kąt pochylenia powierzchni bocznej $\alpha = 30^\circ$;
- kąt wzniosu γ równy $1^\circ 30'$, $2^\circ 30'$ i $3^\circ 30'$;
- grubości ścianek g_0 , które wynosiły odpowiednio dla materiałów wsadu: stal C45 – 2 mm, 3 mm i 4 mm; stal R35 – 2,3 mm, 3,6 mm oraz 5 mm, metali nieżelaznych (stop aluminium i stop tytanu) – 3 mm i 4 mm;
- prędkość liniowa szczęki v_{sz} równa 0,10 m/s, 0,16 m/s i 0,25 m/s (próby przeprowadzone dla stali gatunku R35).

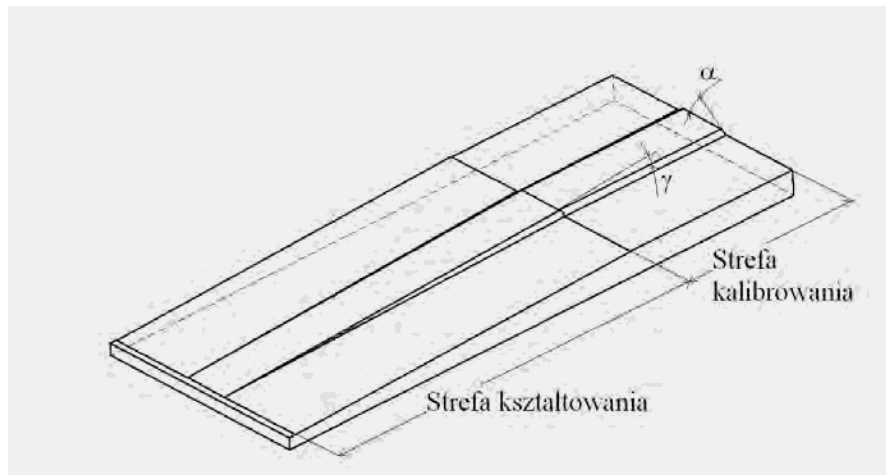
4. Modelowanie numeryczne procesu obciskania obrotowego wyrobów drążonych

Do symulacji procesu kształtowania wyrobów drążonych metodą obciskania obrotowego, zastosowano modelowanie numeryczne bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). Stosowanie tej metody w analizie różnych zadań z zakresu mechaniki jest obecnie standardem, o czym świadczy m.in. duża liczba konferencji naukowych i opracowań dotyczących tego zagadnienia. Przykładowo autorzy prac [9 ÷ 11, 14, 25 ÷ 28, 36, 37, 49] wielokrotnie stosowali metodę MES do analizy kształtowania (metodą WPK) wyrobów z wsadów pełnych. Obliczano wówczas rozkłady odkształceń i naprężeń w odkuwkach, wyznaczano parametry siłowe, analizowano zjawiska zakłócające stabilność procesu kształtowania, jak również badano nowe metody kształtowania. Na powszechność stosowania obliczeń numerycznych ma wpływ również wzrost liczby pakietów oprogramowania komputerowego służących do projektowania i optymalizacji procesów obróbki plastycznej.

4.1. Podstawy procesu obciskania obrotowego

Przebieg procesu obciskania obrotowego można porównać do kształtowania metodą walcowania klinowo – rolkowego (WKR) na rolkach profilowych. W odróżnieniu od procesu WKR typowe narzędzie klinowe zastępuje się szczęką górną płaską (rys. 4.1), która ma dwie strefy: kształtowania – gdzie wyrób obciskany jest na całej długości kształtowanego stopnia odkuwki (od początku procesu następuje tutaj stopniowa redukcja średnicy zewnętrznej w strefie obciskanego stopnia), oraz kalibrowania – w której usuwane są nieregularności kształtu powstałe we wcześniejszym etapie procesu. Natomiast rolki profilowe są identyczne jak w procesie WKR. Spełniają one rolę podtrzymująco-kształtującą,

gdyż odkuwka w wyniku oddziaływania szczęki płaskiej wciskana jest w występy rolek.



Rys. 4.1. Schemat szczęki górnej stosowanej w procesie obciskania obrotowego

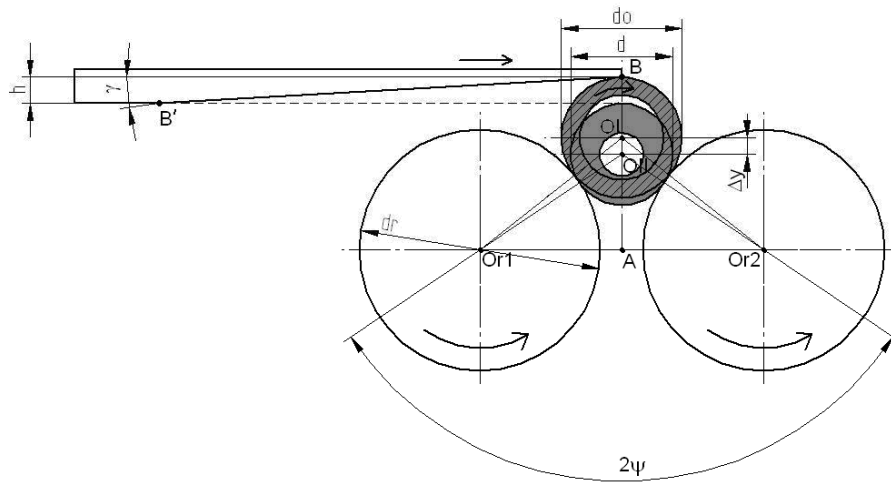
Dla tego by proces obciskania obrotowego przebiegał prawidłowo, konieczne jest odpowiednie dobranie parametrów narzędzi, które muszą spełniać ograniczenia geometryczne. Na rys. 4.2 przedstawiono schemat procesu obciskania, na podstawie którego wyprowadzono zależności dla właściwego doboru wielkości tych parametrów. Przyjęto, że średnica zewnętrzna rolek równa jest d_r i, że są one symetrycznie rozmieszczone względem płaszczyzny przebiegającej przez oś kształtowanego wyrobu i prostopadłej do płaszczyzny przebiegającej przez osie rolek. Położenie rolek określone jest przez kąt rozstawu rolki ψ (rys. 4.2). W celu uproszczenia obliczeń wprowadzono współczynnik ξ , zdefiniowany jako:

$$\xi = \frac{d_r}{d_0}. \quad (4.1)$$

Ze względu na podobieństwo schematów procesów WKR na rolkach profilowych i obciskania obrotowego zależności na ograniczenia parametrów w obu przypadkach kształtowania są podobne. Dobór kąta rozstawu rolek ψ powinien być dokonany w przedziale wartości minimalnej obliczonej z zależności (2.2) i

wartości maksymalnej określonej zależnością (2.5). Wielkość maksymalnego stopnia gniotu wyznacza się z zależności (2.6). W trakcie projektowania szczęki górnej istotna jest także znajomość przemieszczenia narzędzia z punktu B do B', uwzględniająca jego przesunięcie w kierunku pionowym o wartość h :

$$h = \frac{1}{2} \left[\left(\sqrt{(d_r + d_0)^2 - (d_r + d)^2 \sin^2 \psi} - (d_r + d) \cos \psi \right) + (d_0 - d) \right]. \quad (4.2)$$



Rys. 4.2. Schemat procesu obciskania obrotowego

4.2. Zakres obliczeń

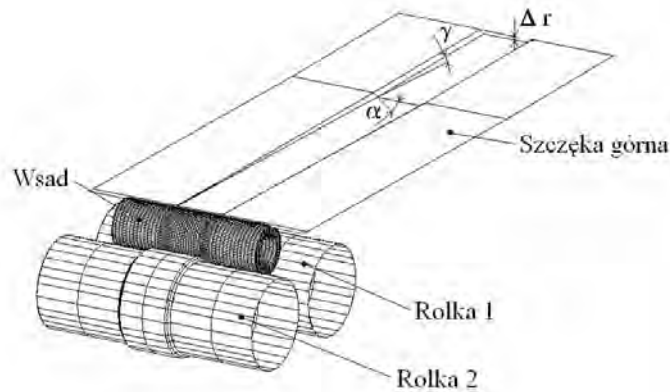
Do obliczeń numerycznych procesu obciskania obrotowego wykorzystano komercyjny pakiet oprogramowania MSC.SuperForm 2005, który umożliwia prowadzenie mechanicznej lub termomechanicznej symulacji procesów kształtowania w warunkach: płaskiego, osiowo – symetrycznego, lub przestrzennego stanu odkształcenia [66].

W celu skrócenia czasu obliczeń w analizowanych przypadkach kształtowania wyrobów drążonych założono, że:

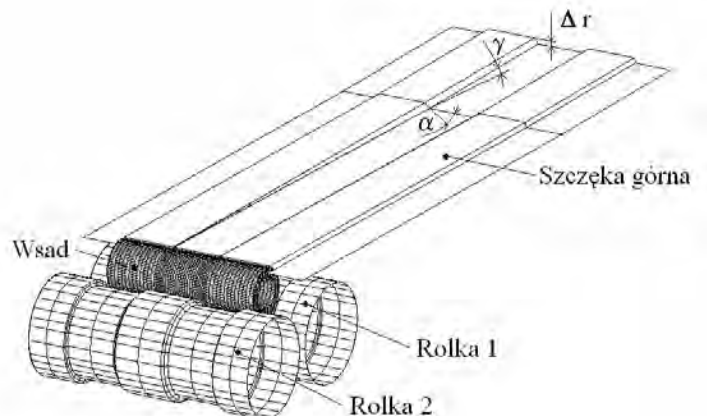
- wartość czynnika tarcia na powierzchni styku materiał – narzędzie jest stała, $m = 1$;

- model materiału narzędzi jest sztywny, czyli są one nieodkształcalne w trakcie procesu obciskania;
- wpływ zaokrąglenia krawędzi narzędzi na przebieg procesu jest pomijalny.

a)



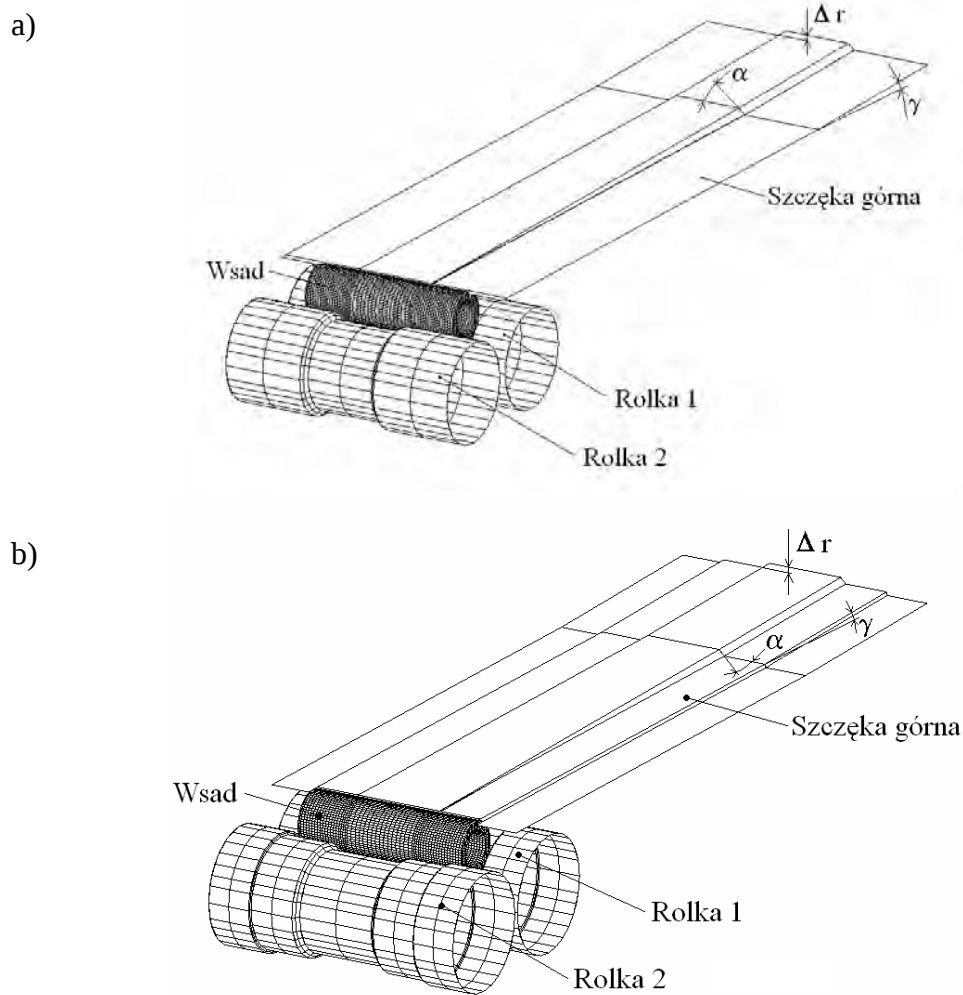
b)



Rys. 4.3. Modele procesu obciskania obrotowego wyrobu w jego części centralnej; a) bez listew oporowych, b) z listwami oporowymi

W analizie założono, że materiał wsadu to stal w gatunku C45, której model materiałowy wczytano z biblioteki wykorzystywanego oprogramowania. Przyjęto, że wyrób będzie kształtowany z wsadu drążonego o wymiarach zewnętrznych $\varnothing 25 \times 80$ mm i grubości ścianki 4 mm. Analizie poddano wpływ kąta kształtowania α (pochylenia powierzchni bocznej na przejściu między stopniami) w zakresie $20^\circ \div 45^\circ$, kąta wzniosu szczęki górnej $\gamma = 1^\circ 30' \div 3^\circ 30'$, stopnia gniotu δ (gdzie: $\delta = d_0/d$) wynoszącego: 1,19; 1,25; 1,32 oraz 1,39 na

przebieg obciskania obrotowego. Rozważano dwa przypadki zlokalizowania strefy kształtowania w odkuwce: w części centralnej oraz na końcach. W trakcie prowadzonych obliczeń powstała idea zastosowania narzędzi z pierścieniami oporowymi. Miały one ograniczyć płynięcie materiału w kierunku osiowym, wymuszając bardziej intensywne jego płynięcie w kierunku promieniowym. W efekcie powstały cztery schematy procesu obciskania, których modele geometryczne pokazano na rys. 4.3 ÷ 4.4.



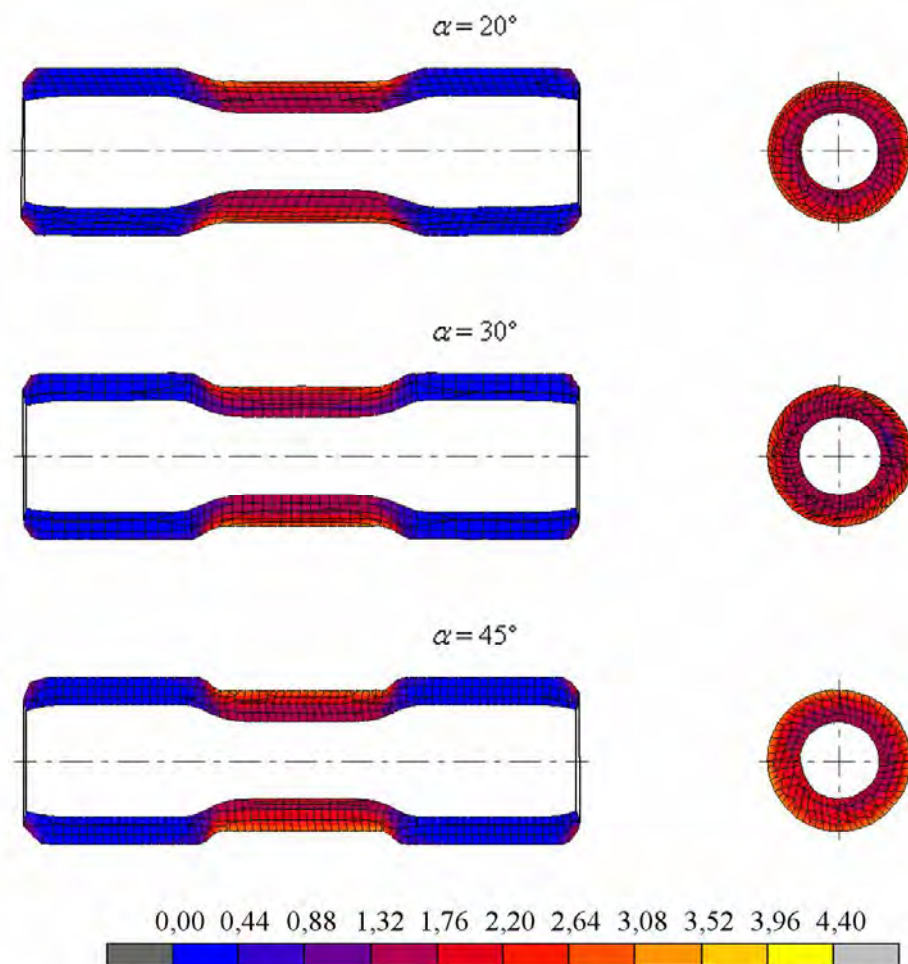
Rys. 4.4. Modele procesu obciskania obrotowego wyrobu na jego końcach; a) bez listew oporowych, b) z listwami oporowymi

W opracowanych modelach MES procesu obciskania obrotowego założono, że szczeka górna porusza się z prędkością 120 mm/s, natomiast prędkość obrotowa rolek (równa 4,8 rad/s) podtrzymujących wsad jest tak dobrana, by prędkość

liniowa na ich maksymalnie oddalonych od osi obrotu powierzchniach zewnętrznych była taka jak prędkość szczęki górnej. Ponadto w obliczeniach, przyjęto temperaturę początkową wsadu równą 1150 °C, temperaturę narzędzi 150°C, współczynnik wymiany ciepła między narzędziami a materiałem 10 kW/m²K oraz między materiałem a otoczeniem 0,3 kW/m²K.

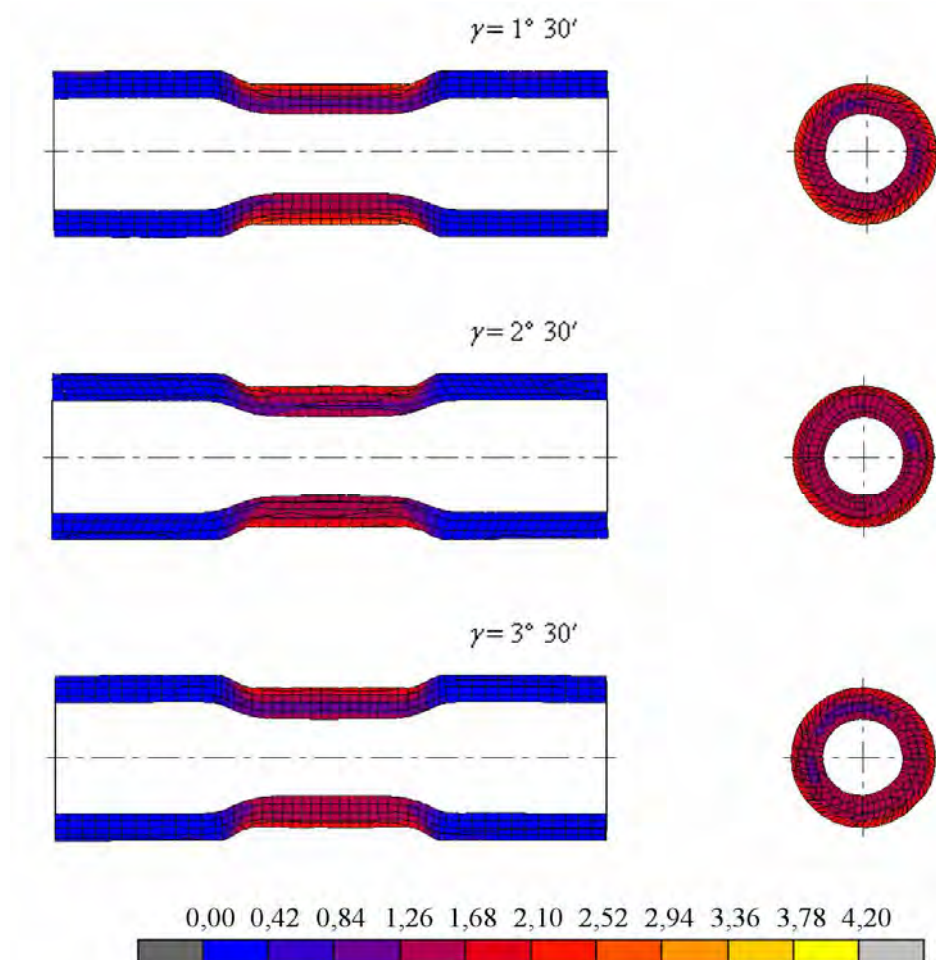
4.3. Stan odkształceń plastycznych

W efekcie obliczeń numerycznych MES wyznaczono mapy odkształceń plastycznych w wyrobach drążonych, na podstawie których przeanalizowano wpływ zmiany parametrów procesu na rozkłady intensywności odkształcenia w



Rys. 4.5. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami z listwami oporowymi, przy $\gamma = 1^\circ 30'$ i $\delta = 1,19$

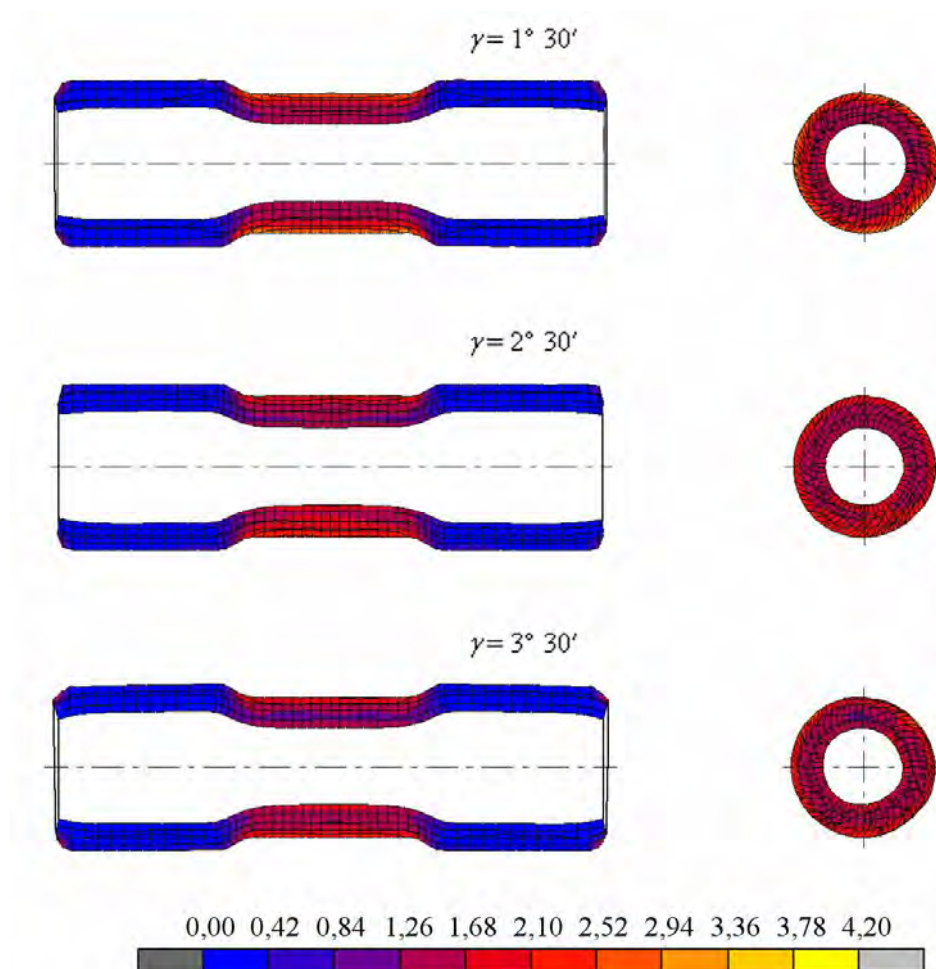
obciskanych odkuwkach. Na rys. 4.5 pokazano wpływ kąta kształtującego α w zakresie $20^\circ \div 45^\circ$, odnotowany dla kąta wzniosu $\gamma = 1^\circ 30'$ i stopnia gniotu $\delta = 1,19$. Jak wynika z uzyskanych danych, w tym przypadku największe odkształcenia występują w procesie realizowanym przy $\alpha = 45^\circ$. Lokalizowane są one na powierzchni zewnętrznej kształtowanego przewężenia. Należy przy tym zauważyć, że różnice wartości intensywności odkształcenia odnotowane w poszczególnych przypadkach są niewielkie.



Rys. 4.6. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami bez listew oporowych, przy $\alpha = 30^\circ$ i $\delta = 1,19$

Zwiększenie kąta wzniosu γ powoduje skrócenie strefy kształtowania, co w efekcie wpływa na całkowitą długość szczęki górnej. Największe odkształcenia występują w próbkach kształtowanych narzędziem o najmniejszym kącie γ

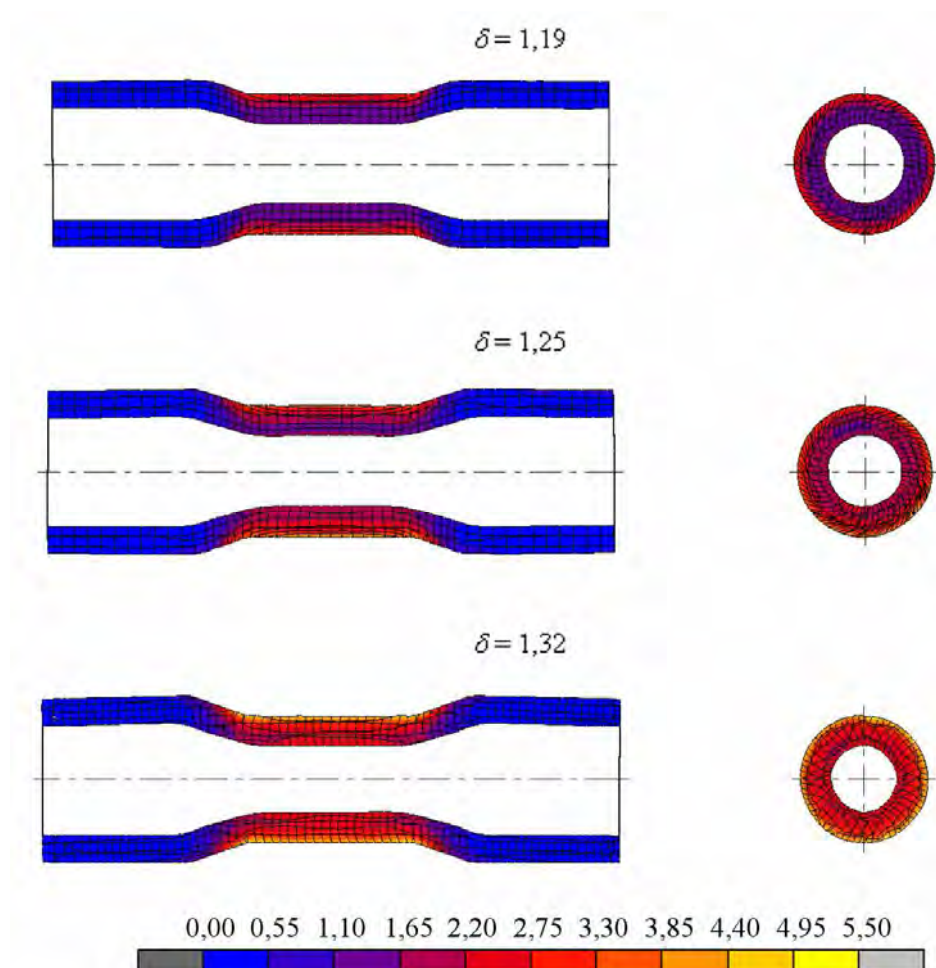
równym $1^{\circ} 30'$ (rys. 4.6 i 4.7). Pozwala to przepuszczać, że przy mniejszych kątach wzniosu γ (a w konsekwencji przy wydłużonej strefie kształtowania) w odkuwce występuje zwiększone płynięcie obwodowe metalu prowadzące do wzrostu odkształceń postaciowych, nie związanych ze zmianą kształtu wyrobu. W tych przypadkach obciskania udział odkształceń zbędnych zwiększa się.



Rys. 4.7. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami z listwami oporowymi, przy $\alpha = 30^{\circ}$ i $\delta = 1,19$

Listwy oporowe ograniczają płynięcie osiowe materiału, wymuszając tym samym większe odkształcenia promieniowe, co korzystnie wpływa na przyrost grubości ścianek. W odkuwce kształtowanej narzędziami z zastosowanymi listwami oporowymi i charakteryzowanymi kątem $\gamma = 1^{\circ} 30'$ (rys. 4.7) można zaobserwować warstwowy charakter odkształceń plastycznych w płaszczyźnie

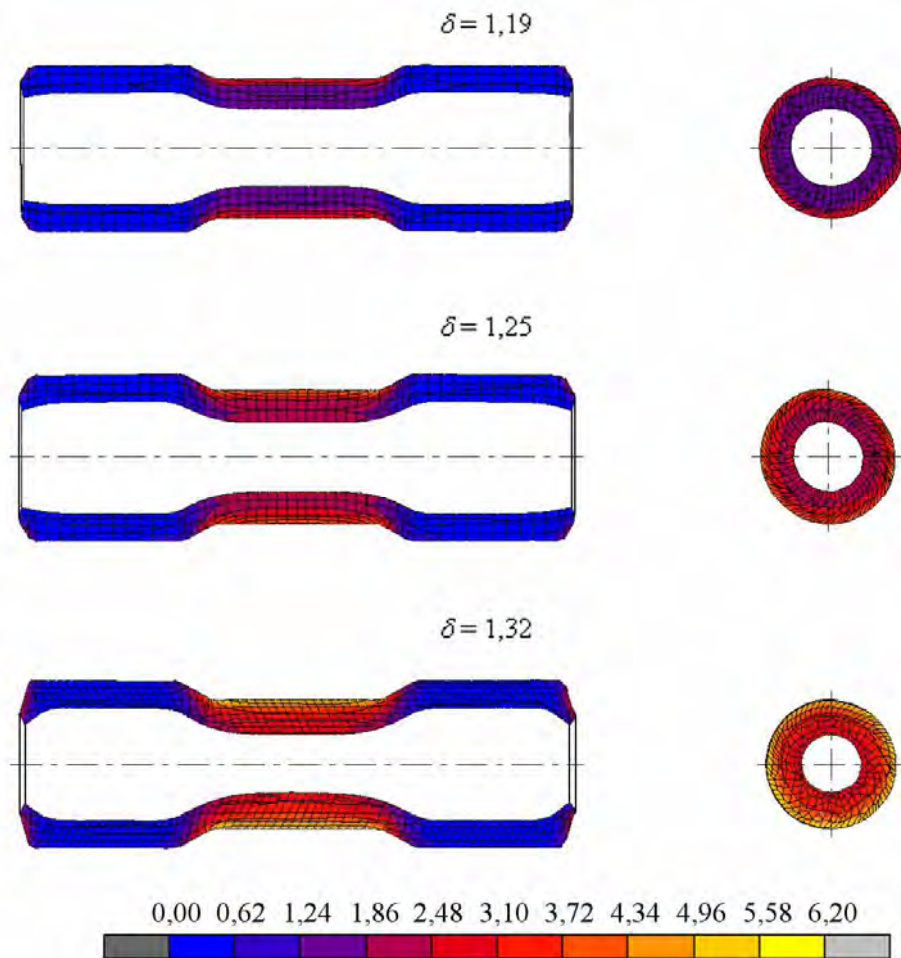
wzdłużnej oraz ich rozkład pierścieniowy w płaszczyźnie poprzecznej. Przy czym największe odkształcenia występują w warstwie zewnętrznej ukształtowanego przewężenia i są skutkiem intensywnego oddziaływania naprężeń stycznych (skutek tarcia) na powierzchni kontaktu materiał-narzędzie.



Rys. 4.8. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami bez listew oporowych, przy $\alpha = 20^\circ$ i $\gamma = 1^\circ 30'$

Największy wpływ na wielkość odkształceń w wyrobie obciskanym wywiera zastosowany stopień gniotu. Analizując dane przedstawione na rys. 4.8 i 4.9 można stwierdzić także, że stosowanie listew oporowych wywołuje dodatkowy wzrost intensywności odkształcenia, wynikający z wymuszenia przez te listwy zwiększonego płynięcia materiału w kierunku promieniowym. Odnosnie wpływu ilościowego δ na wartość intensywności odkształcenia stwierdzono, że

zwiększenie δ z 1,19 do 1,32 powodowało ponad dwukrotny wzrost intensywności odkształcenia.

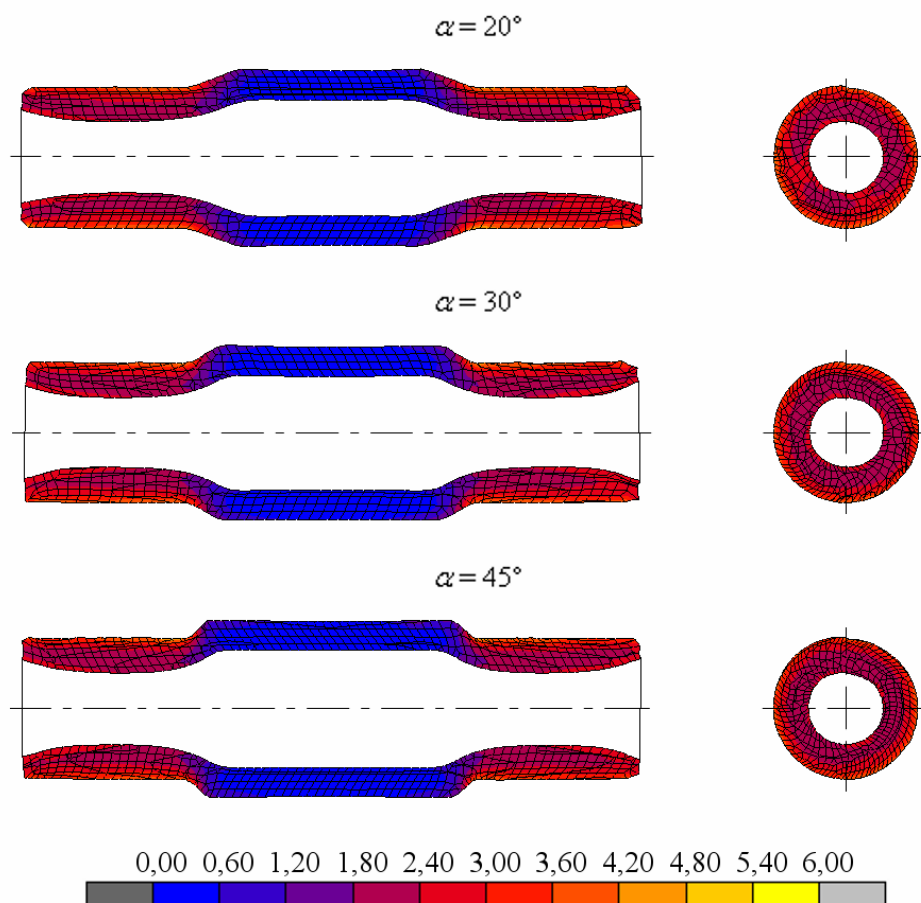


Rys. 4.9. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami z listwami oporowymi, przy $\alpha = 30^\circ$ i $\gamma = 1^\circ 30'$

Jak już wspomniano zwiększenie gniotu oraz stosowanie listew oporowych prowadzi do wzrostu promieniowego płynięcia metalu. Znajduje to odbicie w rozkładach intensywności odkształcenia, które są bardziej zróżnicowane (warstwy pierścieniowe są znacznie wyraźniejsze). Efekt ten dobrze widoczny jest na przykład na rysunku 4.9, w wyrobie ukształtowanym z największym stopniem gniotu równym 1,32. Należy przy tym wspomnieć, że niezależnie od zastosowanego stopnia gniotu δ największe odkształcenia lokalizowane są w

warstwach zewnętrznych, a najmniejsze w wewnętrznych ukształtowanego przewężenia.

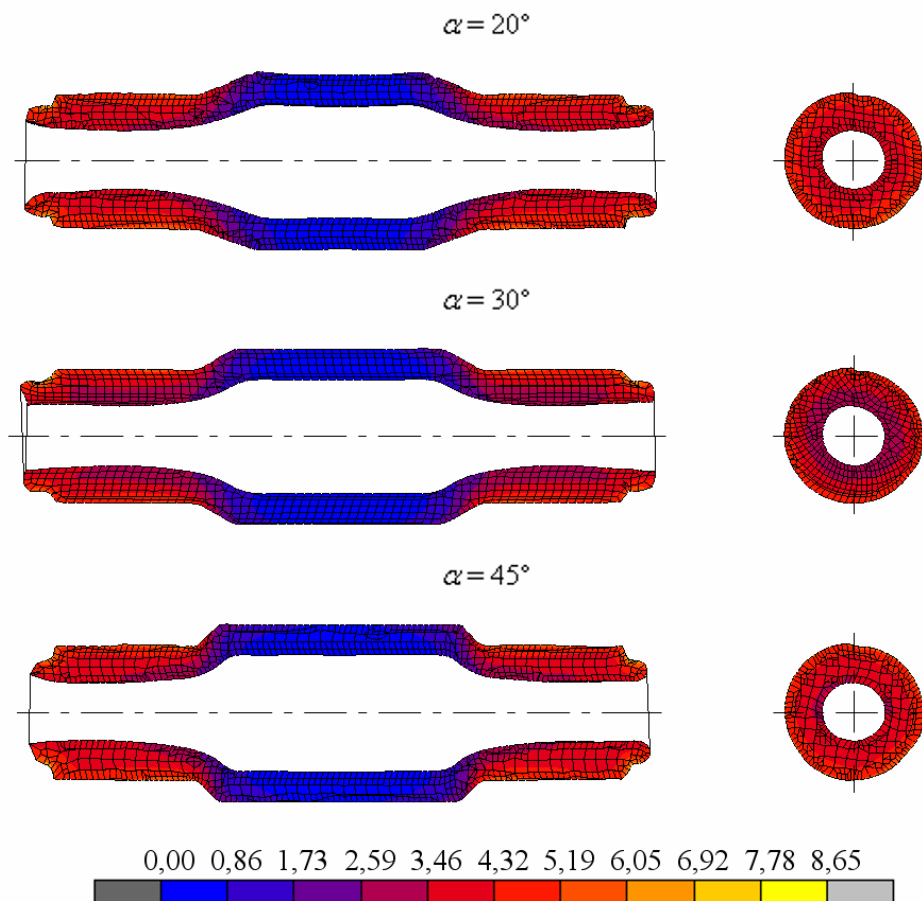
Kształtowanie stopni wałków metodą obciskania obrotowego nie ogranicza się tylko do redukcji przekroju w części centralnej. Można go dokonać również na końcach wyrobu (wałka drążonego). Z tego względu przeprowadzono także obliczenia walcowania dla tak usytuowanych przewężeń. W analizie tej przyjęto takie same kryteria jak w przypadkach rozważanych poprzednio. Na rys. 4.10 pokazano wpływ kąta α na intensywność odkształceń plastycznych. Widoczne jest, że największe odkształcenia występują przy zastosowaniu narzędzi z kątem pochylenia powierzchni kształtowania równym 45° .



Rys. 4.10. Obliczone MES rozkłady intensywności odkształcenia w wyrobach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami bez listew oporowych, przy $\gamma = 1^\circ 30'$ i $\delta = 1,25$

Porównując oba przypadki położenia stref kształtowanych stopni odnotowuje się podobieństwo w uzyskiwanych rozkładach odkształceń.

Zastosowanie listew oporowych zarówno podczas obciskania w części centralnej jak i na końcach wyrobu powoduje wzrost intensywności odkształcenia. Ponadto, zauważono, że maksymalne odkształcenia plastyczne występują w narożach przejścia pomiędzy stopniem centralnym i skrajnym (końcowym) kształtowanego wyrobu drążonego. Widoczne jest także, że nadmiar metalu wypływa nad listwy oporowe, tworząc odpad w formie wypływki pierścieniowej – rys. 4.11. Tę część materiału należy usunąć w trakcie późniejszej obróbki mechanicznej wyrobu.



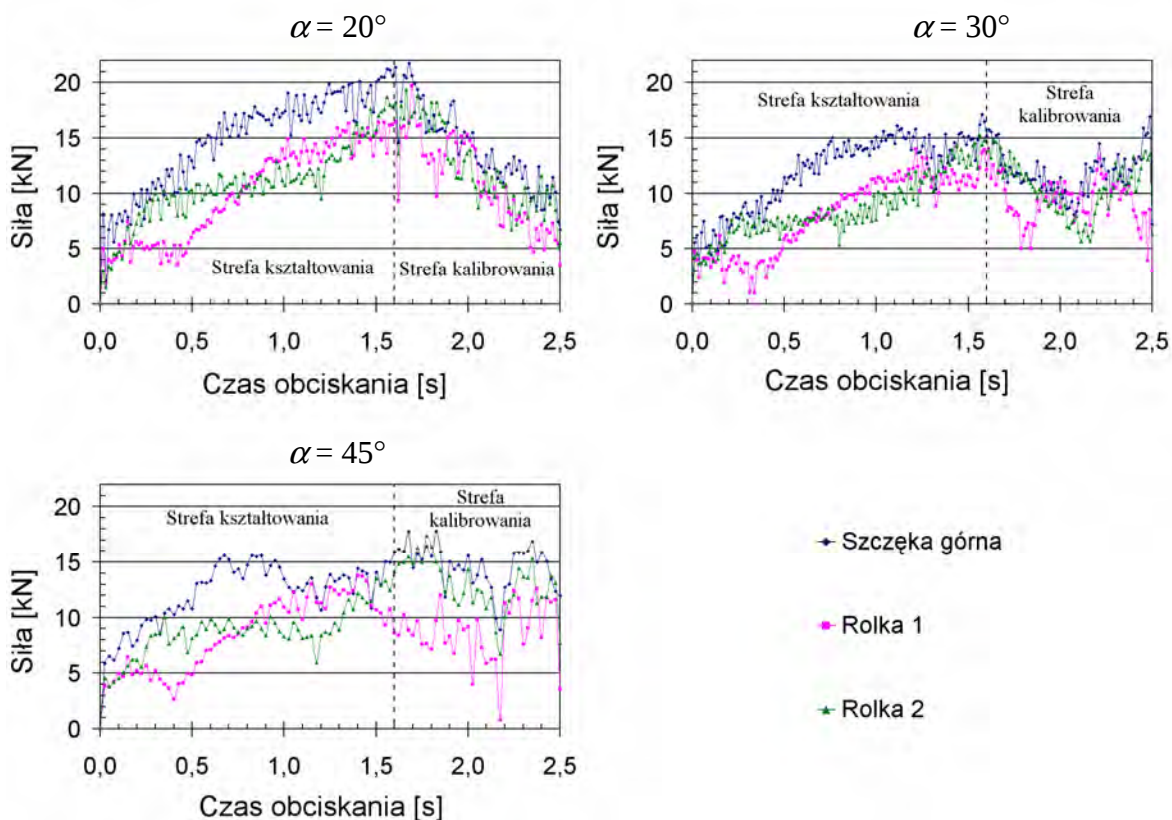
Rys. 4.11. Obliczone rozkłady intensywności odkształcenia w próbkach drążonych, otrzymanych w procesach obciskania obrotowego realizowanych narzędziami z listwami oporowymi, przy $\gamma = 1^\circ 30'$ i $\delta = 1,32$

4.4. Siły w procesie obciskania obrotowego

Siła kształtowania F występująca podczas procesu obciskania obrotowego może być rozłożona na składowe skierowane zgodnie z układem kartezjańskim. Można zatem wyróżnić siły: F_x – styczną (działającą zgodnie z kierunkiem posuwu szczęki górnej), F_z – osiową (skierowaną zgodnie z osią obrotu odkuwki) i F_y – rozporową (prostopadła do składowych F_x i F_z). Znajomość składowych sił osiowej i rozporowej konieczna jest już na etapie projektowania procesu obciskania, ponieważ ich maksymalne wartości decydują o możliwości przeprowadzenia procesu w danej walcierce. Składowa siła F_y oddziałuje na narzędzia, a za ich pośrednictwem na korpus walcarki. Natomiast składowa F_x decyduje o możliwości realizacji procesu obciskania (jest niezbędna do wywołania posuwu szczęki górnej).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano szereg interesujących wyników, po przeanalizowaniu których stwierdzono, że największa siła kształtowania występuje na szczęce płaskiej. Natomiast siły na rolkach w strefie kształtowania zmieniają się w sposób cykliczny. Na rys. 4.12 zestawiono rozkłady sił kształtujących obliczonych dla $\gamma = 1^\circ 30'$, $\delta = 1,19$ oraz kąta kształtującego zmienianego w zakresie $20^\circ \div 45^\circ$. Największe siły odnotowano przy zastosowaniu narzędzi z kątami $\alpha = 20^\circ$, natomiast przy kątach α równych 30° i 45° odnotowano siły na podobnym poziomie. Zmniejszenie kąta α powodowało wzrost pola powierzchni kontaktu materiał-narzędzie, co w konsekwencji wywoływało zwiększenie siły kształtowania.

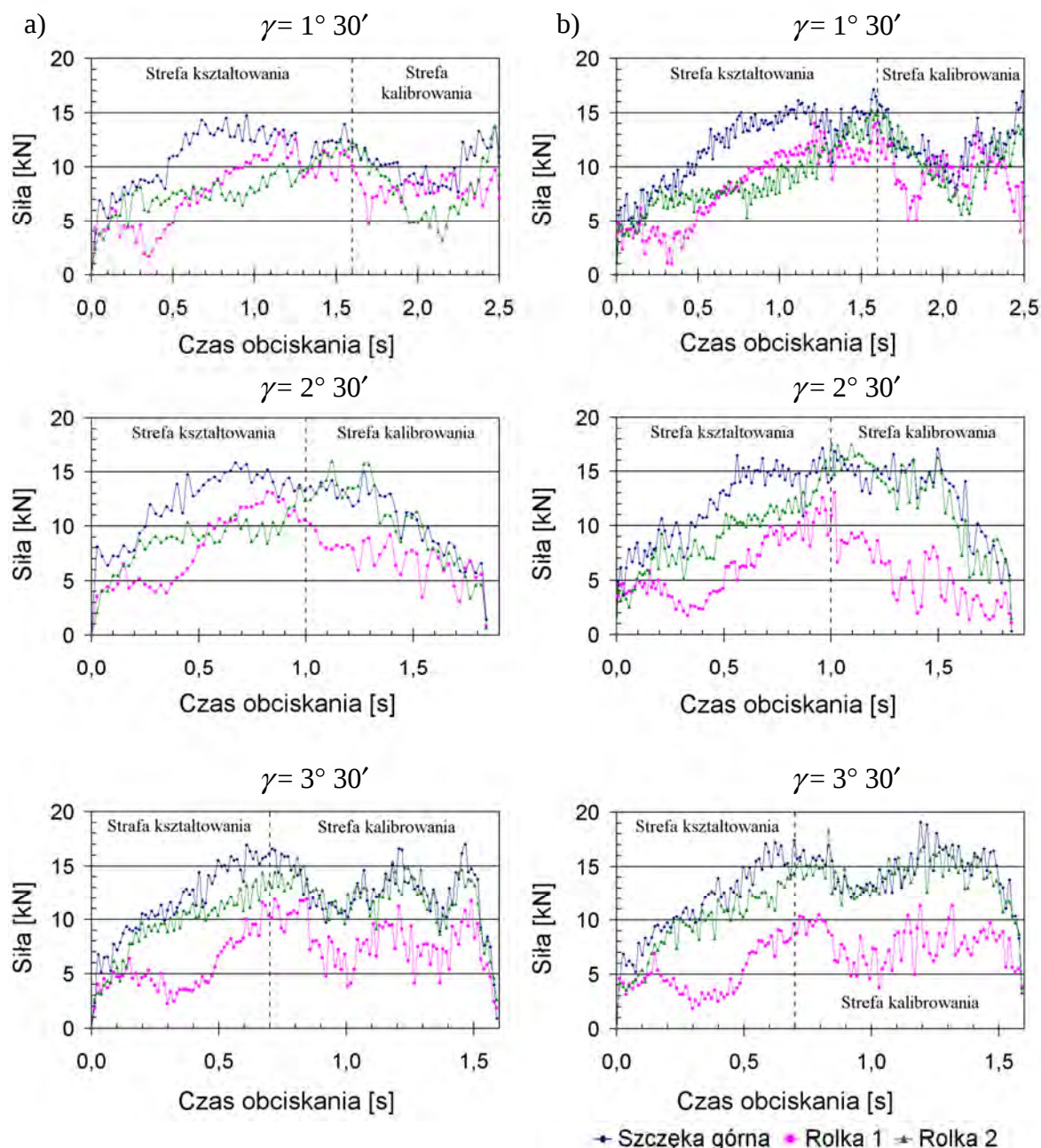
Porównując przypadki obciskania obrotowego (rys. 4.13) różniące się typem zastosowanych narzędzi kształtujących (bez listew oporowych i z listwami oporowymi), można stwierdzić występowanie większych sił w procesach obciskania z listwami oporowymi.



Rys. 4.12. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach obciskania obrotowego (w części centralnej wyrobu) z listwami oporowymi, przy: $\gamma = 1^{\circ}30'$, $\delta = 1,19$ oraz różnych α

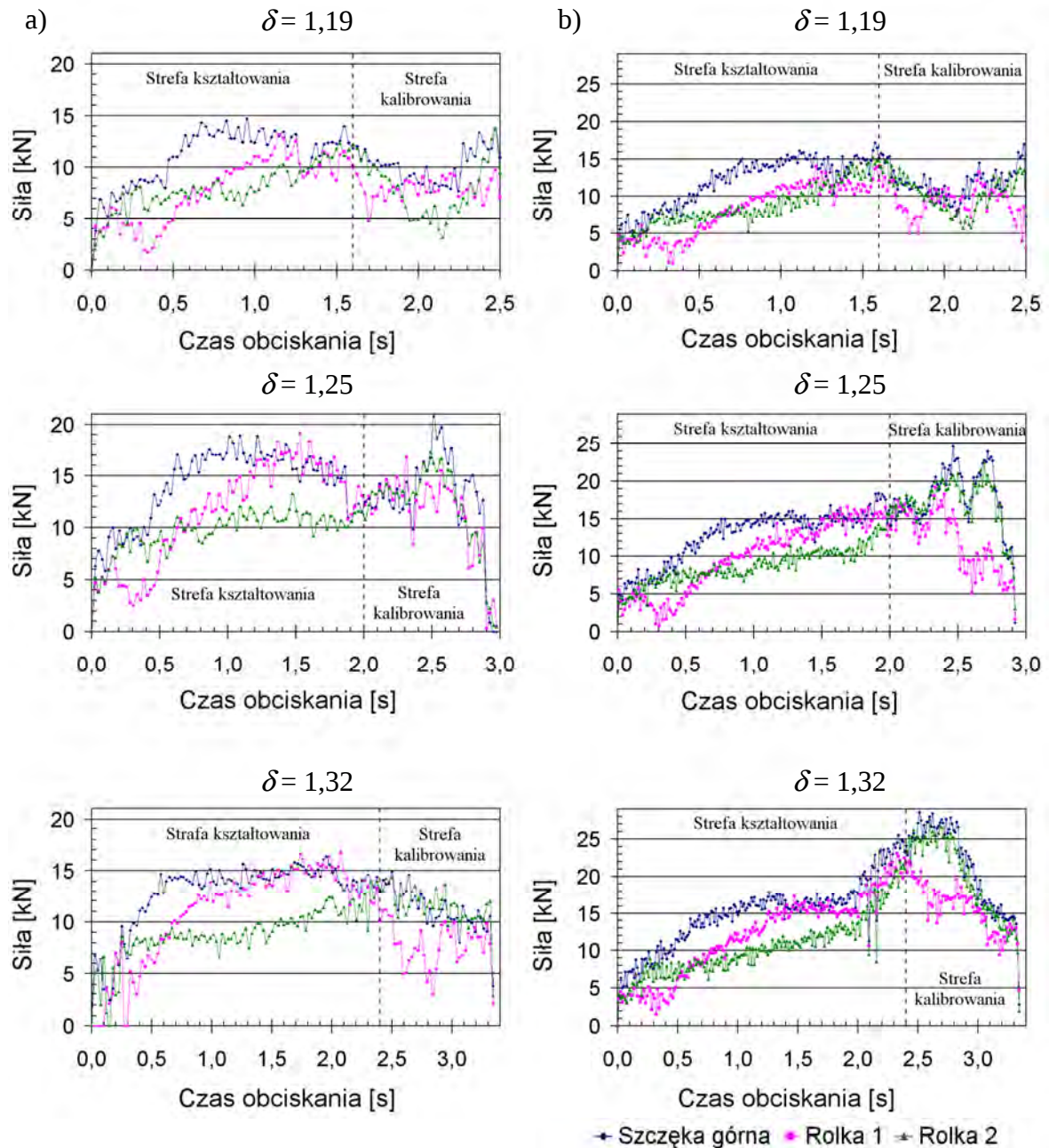
Tłumaczy się to tym, że listwy oporowe ograniczają płynięcie metalu w kierunku osiowym wymuszając tym samym intensywniejsze promieniowe płynięcie materiału, co szczególnie jest widoczne przy większych stopniach gniotu. Prowadzi to do wzrostu grubości ścianki w obszarze przewężenia co z kolei musi znaleźć odbicie w zwiększeniu sił kształtowania.

Znaczący wpływ na wielkość sił obciskania ma zastosowany stopień gniotu δ . Zwiększenie tego parametru skutkuje większymi siłami F w procesie obciskania; co przedstawiono na rys. 4.14. Jak wynika z wykresów podanych na tym rysunku dodatkowy wpływ na zwiększenie sił ma zastosowanie listew oporowych, które najintensywniej ograniczają płynięcie metalu w końcowej fazie procesu obciskania. Tamże zatem siły przyjmują wartości maksymalne, w odróżnieniu od procesów kształtowania realizowanych bez listew.



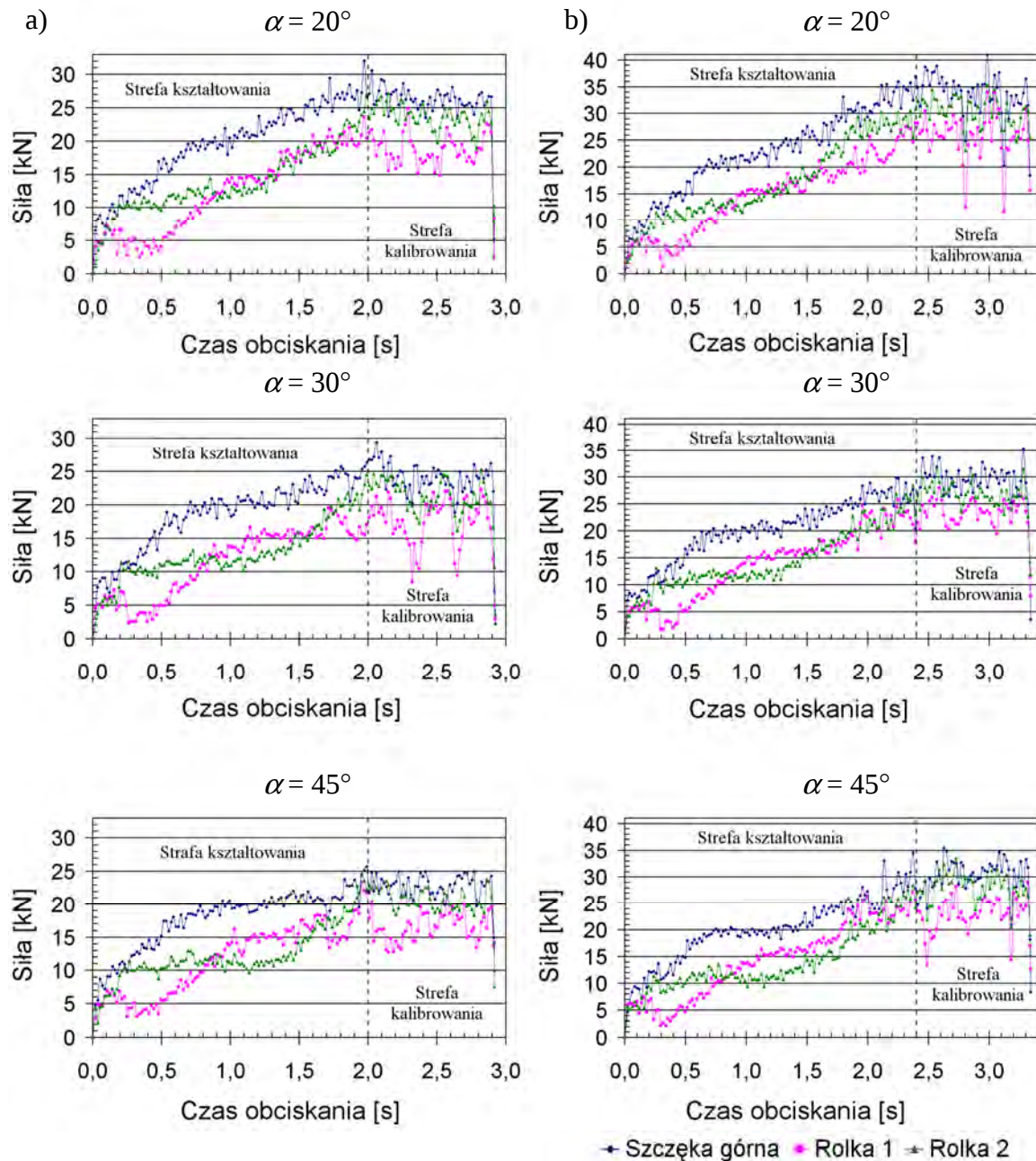
Rys. 4.13. Rozkłady sił kształtowania dla poszczególnych narzędzi w procesach obciskania obrotowego w części centralnej wyrobu; a) bez listew oporowych, b) z listwami oporowymi, przy: $\alpha = 30^\circ$, $\delta = 1,19$ oraz różnych γ

Analizując przypadki kształtowania przewężeń na końcach wyrobu, przebiegające przy różnych kątach α (rys. 4.15), stwierdzono wystąpienie największych sił dla kąta $\alpha = 20^\circ$ a najmniejszych przy $\alpha = 45^\circ$. Jest to konsekwencją wcześniej wspomnianej wielkości powierzchni styku materiał-narzędzie, która zwiększa się wraz ze zmniejszeniem kąta α .



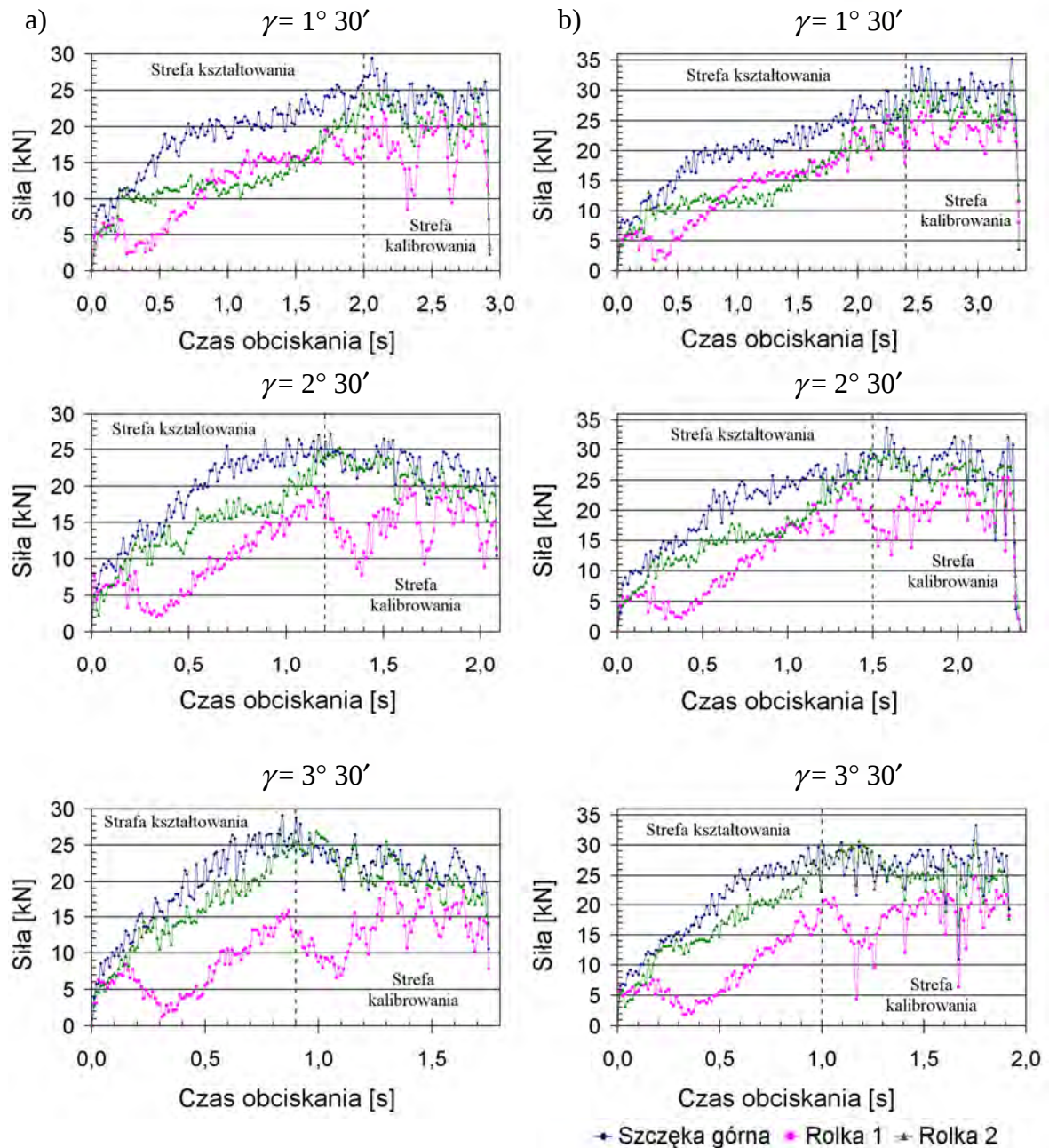
Rys. 4.14. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach obciskania obrotowego w części centralnej wyrobu; a) bez listew oporowych, b) z listwami oporowymi, przy: $\alpha = 30^\circ$, $\gamma = 1^\circ 30'$ oraz różnych δ

Zmiana kąta wzniosu γ (rys. 4.16) powoduje zmianę długości strefy kształtowania, co ma wpływ na rozkłady sił działających na rolki. Przy zastosowaniu szczęki górnej z największym kątem $\gamma = 3^\circ 30'$, występuje wyraźny wzrost siły na rolce 2 względem rolki 1 i to w trakcie całego procesu kształtowania.



Rys. 4.15. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach obciskania obrotowego końców wałków drążonych; a) bez listew oporowych $\delta = 1,25$, b) z listwami oporowymi $\delta = 1,32$, przy: $\gamma = 1^\circ 30'$ oraz różnych α

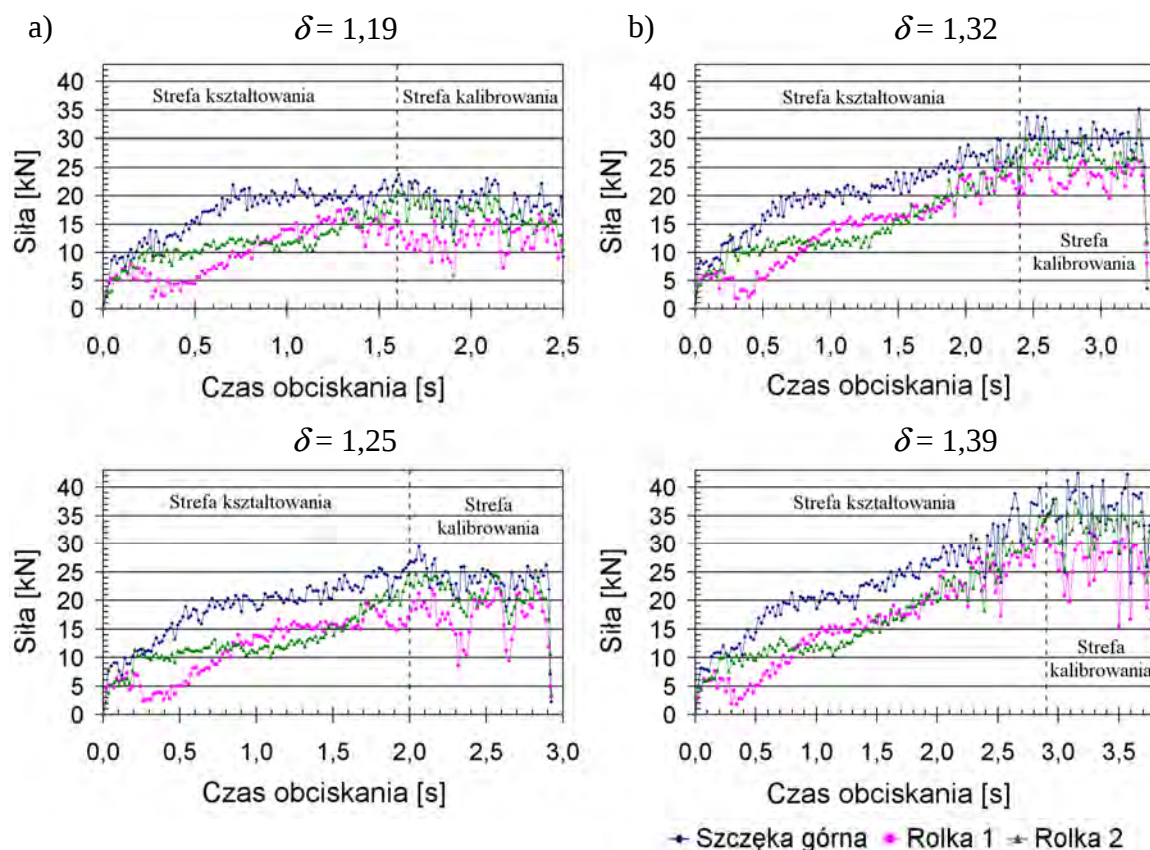
Przy najmniejszym kącie wzniosu ($\gamma = 1^\circ 30'$) siły działające na obie rolki są porównywalne, co oznacza, że oba te narzędzia biorą jednakowy udział w kształtowaniu wyrobu i są podobnie obciążone.



Rys. 4.16. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach obciskania obrotowego końców wałków drążonych; a) bez listew oporowych $\delta = 1,25$, b) z listwami oporowymi $\delta = 1,32$, przy: $\alpha = 30^\circ$ oraz różnych γ

Zmiana stopnia gniotu δ ma decydujący wpływ na wielkość siły kształtowania. Jak wynika z danych pokazanych na rys. 4.17, podobny przebieg sił kształtowania występuje na wszystkich narzędziach. Jest to konsekwencją zastosowanej małej wartości kąta wzniosu γ na szczęcie płaskiej, co powoduje, że

proces przebiega powoli i wszystkie narzędzia biorą podobny, czynny udział w kształtowaniu wyrobu drażonego.

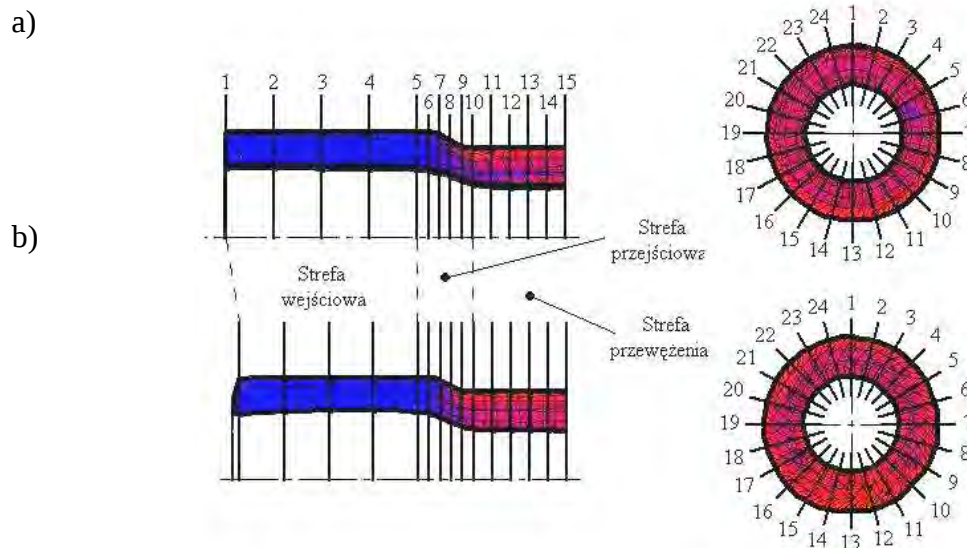


Rys. 4.17. Rozkłady sił działających na poszczególne narzędzia w procesach obciskania obrotowego końców wałków drażonych; a) bez listew oporowych, b) z listwami oporowymi, przy: $\alpha = 30^\circ$, $\gamma = 1^\circ 30'$ oraz różnych δ

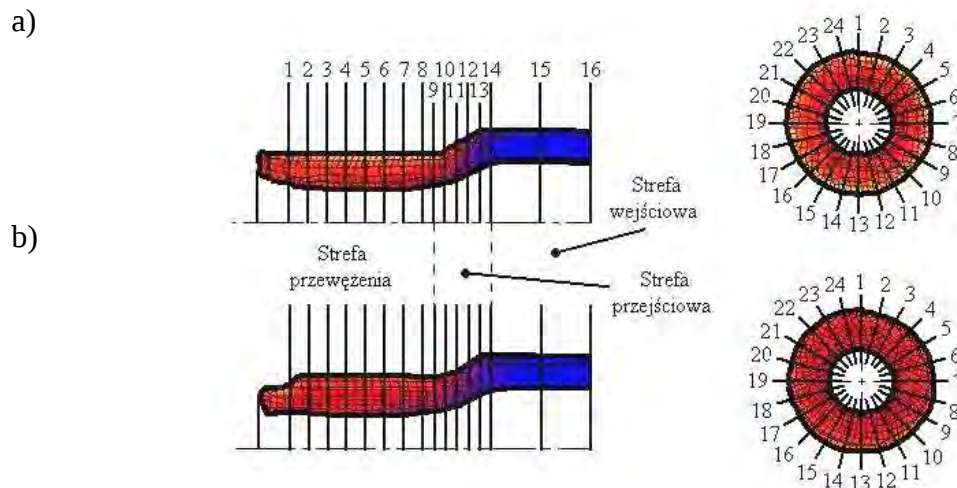
4.5. Zmiana grubości ścianki

Ważnym zagadnieniem w procesie obciskania obrotowego jest zmiana grubości ścianki w odkuwce kształtowanej, gdyż ma to bezpośredni wpływ na własności wytrzymałościowe otrzymanego wyrobu drażonego. Analiza wykonana w tym zakresie pozwoliła na określenie wpływu głównych parametrów procesu, tj.: kąta wzniosu γ i kąta kształtującego α , przy różnych stopniach gniotu δ na to zagadnienie. Do wyznaczenia szacunkowych rozkładów grubości ścianek wykonano przekroje osiowe (wzdłużne) odkuwek otrzymanych w wyniku obliczeń MES w sposób zgodny z rys. 4.18 i 4.19. W przekrojach tych

wyróżniono trzy strefy (wejściową, przejściową i przewężenia) w celu ułatwienia dalszej analizy. Dodatkowo wyznaczono również zmiany grubości ścianek (określone jako $g/g_0 \cdot 100\%$) w przekrojach poprzecznych ukształtowanych stopni.

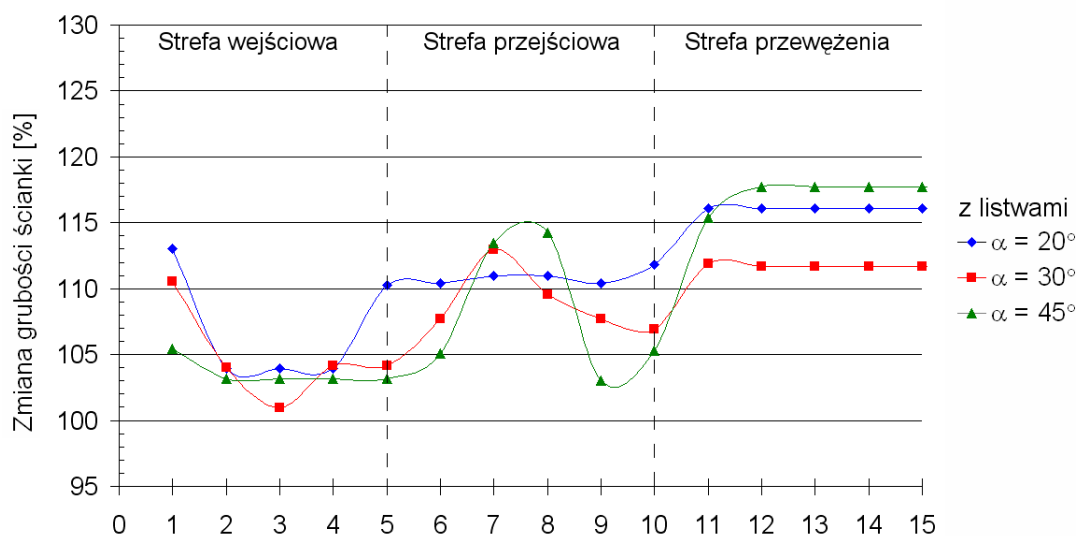


Rys. 4.18. Wyznaczone MES przykładowe przekroje próbek obciskanych obrotowo w części centralnej; a) kształtowanie narzędziami bez listew oporowych, b) kształtowanie narzędziami z listwami



Rys. 4.19. Wyznaczone MES przykładowe przekroje próbek obciskanych obrotowo na końcach; a) kształtowanie narzędziami bez listew oporowych, b) kształtowanie narzędziami z listwami

Na rys. 4.20 przedstawiono wpływ kąta kształtującego α na rozkład grubości ścianki. Stwierdzono, że stosowanie mniejszych kątów α sprzyja bardziej równomiernej zmianie grubości ścianki w strefie przejściowej odkuwki. Większy kąt α powoduje skrócenie tej strefy co skutkuje większymi różnicami grubości na długości. Na uwagę zasługuje fakt, że na całej długości kształtowanego przewężenia odnotowano wzrost grubości ścianki wyrobu, co powinno skutkować zwiększeniem własności wytrzymałościowych.

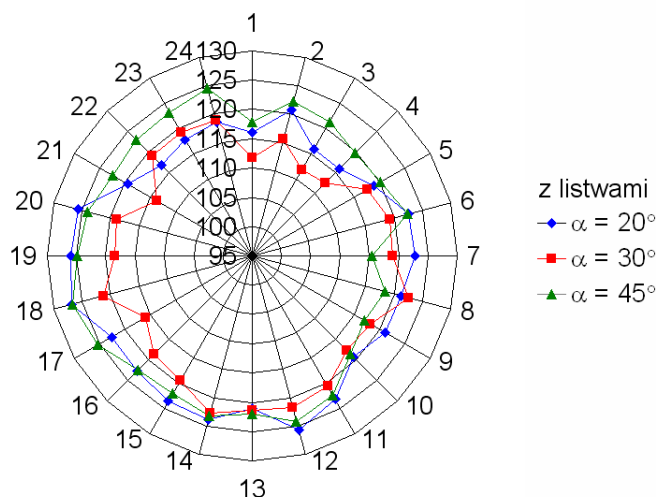


Rys. 4.20. Zmiana grubości ścianek odkuwek w przekroju wzdłużnym, odnotowana dla obciskania przy $\delta = 1,19$ i $\gamma = 1^\circ 30'$ z zastosowaniem listew oporowych

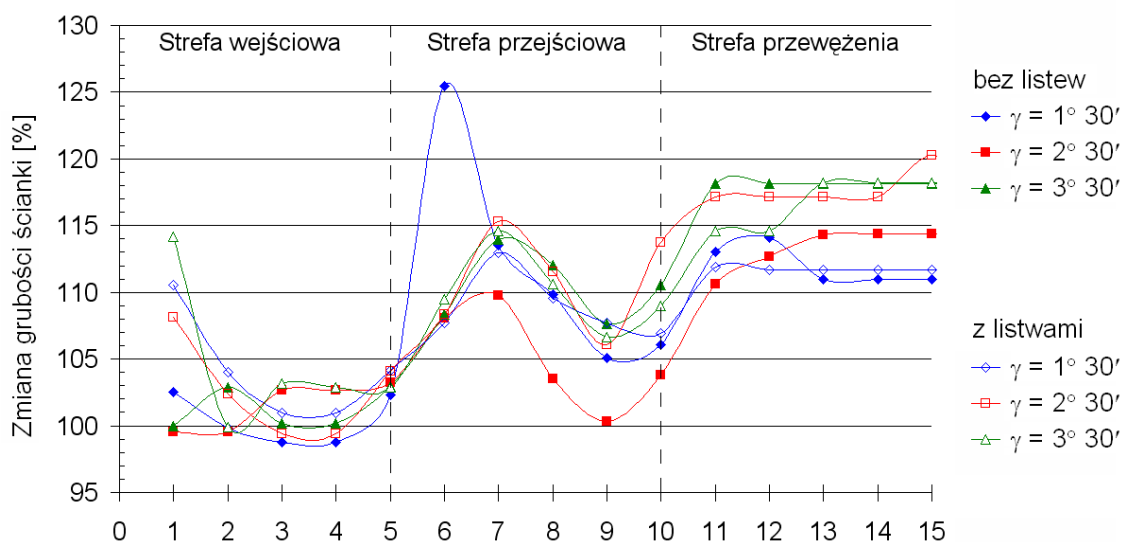
Ze względu na to, że podczas procesu obciskania obrotowego wewnętrzna powierzchnia wyrobu drażonego jest swobodna, zmiana grubości ścianki nie jest jednakowa na całym obwodzie odkuwki. Z tego względu przeprowadzono również analizę rozkładów grubości ścianki na przekroju poprzecznym. Jeden z otrzymanych rozkładów grubości ścianek pokazano na rys 4.21. Największa odnotowana różnica w zmianie grubości, na obwodzie wyrobu, wyniosła dla przedstawionego przypadku kształtowania 11%.

Badając wpływ kąta wzniosu γ na zmianę grubości ścianki (rys. 4.22) stwierdzono, że najmniejszy jej przyrost występuje w odkuwkach kształtowanych narzędziami o najmniejszym kącie γ (równym $1^\circ 30'$). Efekt ten występuje

zarówno w wyrobach kształtowanych przy zastosowaniu narzędzi bez listew jak i z listwami oporowymi. Generalnie stwierdzono, że zwiększeniu przyrostu grubości ścianki sprzyja stosowanie narzędzi z większymi kątami γ .



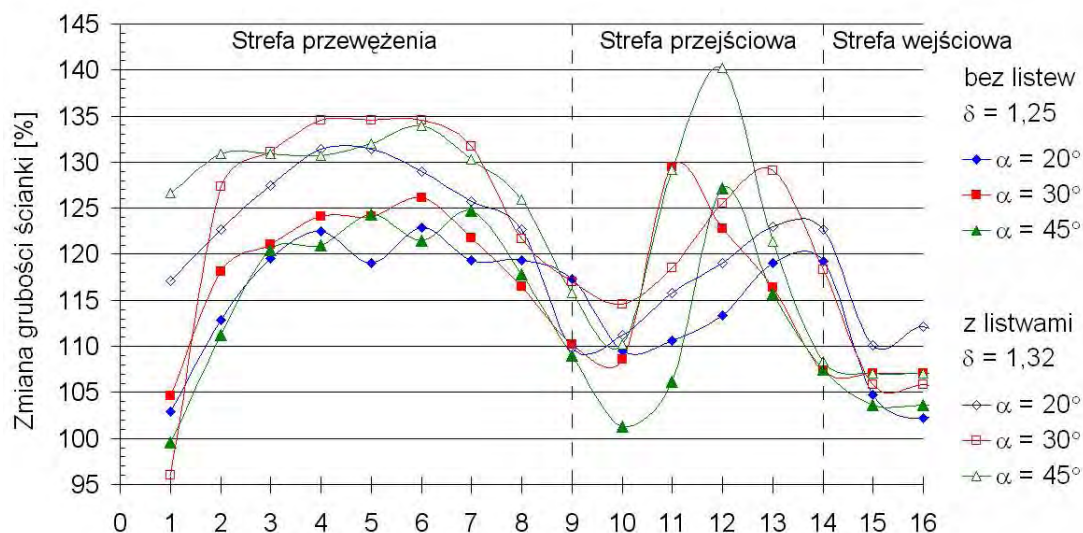
Rys. 4.21. Zmiana grubości ścianek (w %) odkuwek w przekroju poprzecznym (centralnym), obciskanych narzędziami z listwami przy $\delta = 1,19$ i $\gamma = 1^\circ 30'$



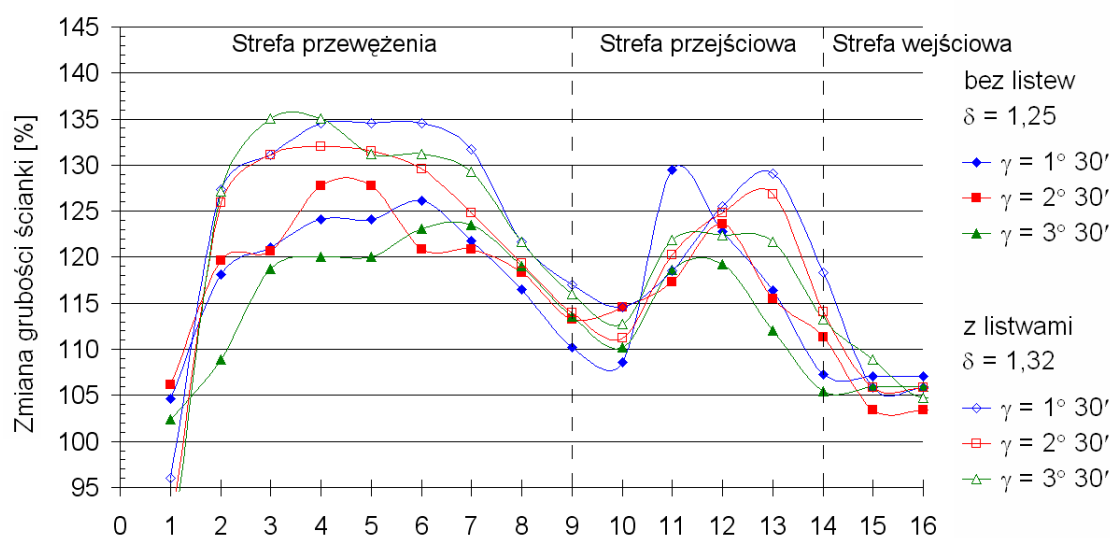
Rys. 4.22. Rozkłady grubości ścianek w przekroju wzdłużnym próbek obciskanych przy $\delta = 1,19$ i $\alpha = 30^\circ$

Podczas obciskania części końcowych wyrobów drążonych zauważono, że podobnie jak przy kształtowaniu w strefie centralnej stosowanie mniejszych kątów γ wpływa na bardziej równomierną zmianę grubości w strefie przejściowej

(rys. 4.23). Zastosowanie listew oporowych zwiększa przyrost grubości ścianki w strefie kształtowanych przewężeń szczególnie na ich końcach. Wywołuje to bardziej równomierną zmianę tej grubości niż ma to miejsce podczas obciskania w części centralnej odkuwki.



Rys. 4.23. Rozkłady grubości ścianek (w przekroju wzdłużnym) próbek obciskanych przy $\gamma = 1^{\circ} 30'$



Rys. 4.24. Rozkłady grubości ścianek (w przekroju wzdłużnym) próbek obciskanych przy $\alpha = 30^{\circ}$

Zmiana kąta wzniosu γ (rys. 4.24) nie powoduje jednoznacznego ilościowego wpływu na przyrost grubości ścianki w obciskanim stopniu wyrobu drążonego. W odkuwkach kształtowanych na ich końcach występuje około 5%

pogrubienie ścianki w strefie wejściowej (nie obciskanej), co spowodowane jest osiowym płynięciem metalu. Z jednej strony wywołuje to przyrost grubości ścianki, a z drugiej na końcach odkuwki występuje wypływ nadmiaru materiału nad listwami oporowymi. Tworzy się wówczas cylindryczna wypływka czołowa, która traktowana jest jako odpad, który należy usunąć po zakończeniu procesu.

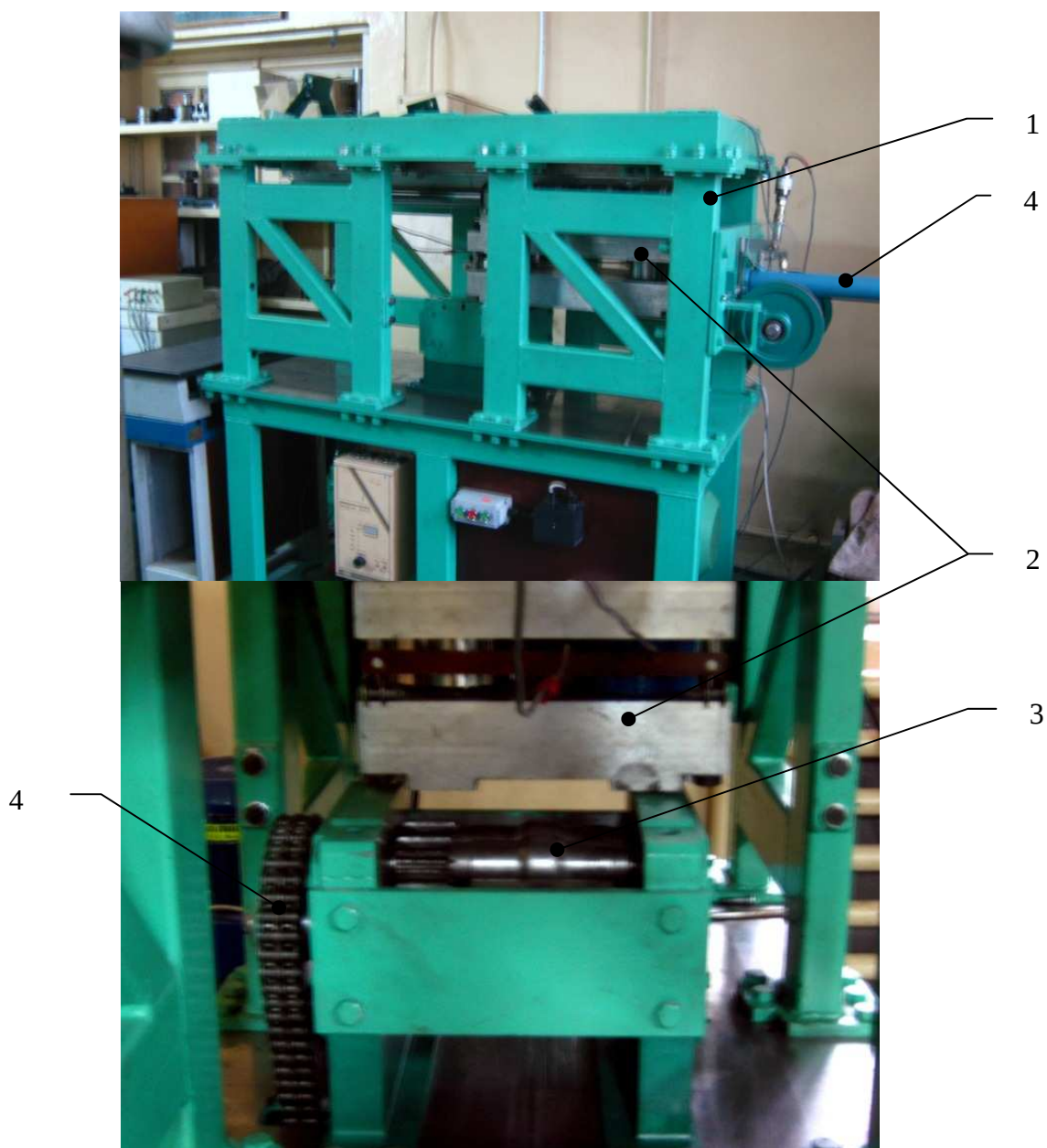
4.6. Podsumowanie wyników analizy teoretycznej

Podsumowując wyniki uzyskane w obliczeniach numerycznych, stwierdza się istotny wpływ badanych paramentów zarówno na przebieg procesu obciskania jak również na kształt otrzymywanych odkuwek. I tak wartość kąta kształtującego α wpływa na uzyskiwaną równomierność zmian grubości ścianki w strefie przejściowej. Zauważono, że najkorzystniejsze pod tym względem są kąty α równe 20° i 30° . Dobór kąta wzniosu γ powinien być natomiast uzależniony od stopnia gniotu δ . Dla większych stopni gniotu zalecane jest stosowanie mniejszych kątów γ , które przy przyjęciu odpowiedniej długości strefy kalibrowania szczęki górnej gwarantują otrzymanie prawidłowego wyrobu (bez wad kształtu przekroju poprzecznego). Wartość kąta wzniosu γ ma wpływ na długość strefy kształtowania, a także na długość całkowitą szczęki górnej, która decyduje między innymi o czasie trwania procesu obciskania oraz o gabarytach urządzenia (wałcarki). Stosowanie listew oporowych wywołuje dodatkowy wzrost grubości ścianki w otrzymywanym wyrobie drążonym. Przyrost ten jest korzystny, gdyż powoduje wzrost własności wytrzymałościowych otrzymywanej odkuwki.

5. Badania doświadczalne

5.1. Stanowisko badawcze

W badaniach doświadczalnych wykorzystano walcarkę laboratoryjną LUW-2, przedstawioną na rysunku 5.1. Głównymi elementami tego urządzenia są: 1 – korpus, 2 – suwak górny, 3 – przekładnia rolkowa oraz 4 – układ napędowy.

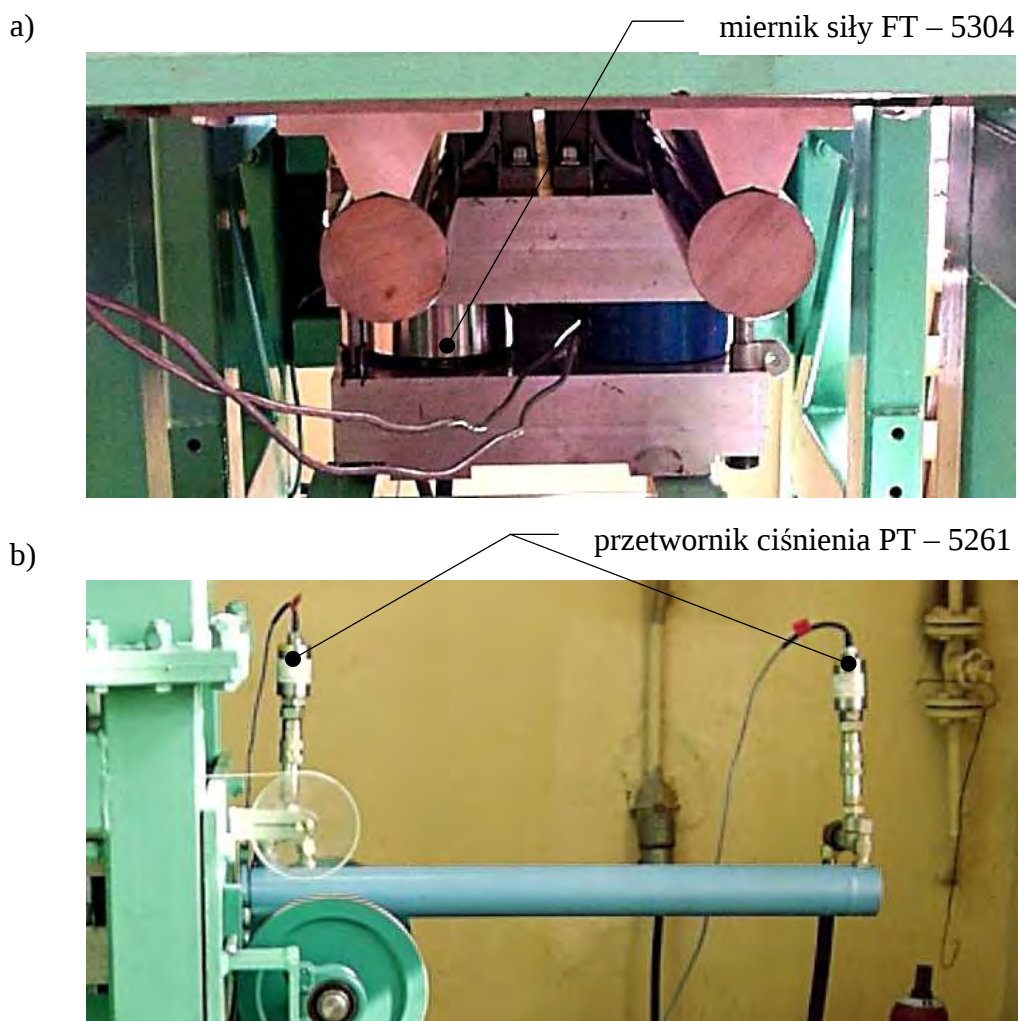


Rys. 5.1. Stanowisko badawcze wykorzystane w próbach laboratoryjnych procesu obciskania obrotowego (opis w tekście)

Korpus stanowi konstrukcja spawano – skręcana składająca się z dwóch płyt wzmocnionych rurami o profilu prostokątnym oraz połączonych ze sobą czterema łącznikami, przenoszącymi obciążenie w trakcie procesu obciskania obrotowego. Napędzany hydraulicznie suwak górny porusza się po wałkach ślizgowych umieszczonych na prowadnicach, przytwierdzonych do płyty górnej. Natomiast na płycie dolnej znajduje się przekładnia rolkowa, napędzana przekładnią łańcuchową. Układ napędowy całego agregatu składa się z układu hydraulicznego (siłownik hydrauliczny z zasilaczem napędzanym silnikiem elektrycznym o mocy 11 kW) napędzającego suwak górny, oraz układu mechanicznego (motoreduktor, przekładnia łańcuchowa) z bezstopniową regulacją (dzięki zastosowaniu falownika) prędkości rolek, napędzanego silnikiem elektrycznym o mocy 4 kW.

Do rejestracji głównych parametrów siłowych i kinematycznych, dokonywanych w czasie realizacji procesu obciskania obrotowego, posłużył specjalny cyfrowy układ pomiarowy. Pomiaru siły rozporowej F_y dokonywano przy pomocy dwóch mierników siły FT – 5304 (rys. 5.2a), umieszczonych w suwaku górnym pomiędzy dwoma płytami. Siłę wciskającą F_x szczękę płaską wyznaczano na podstawie różnicy ciśnień występujących w siłowniku, rejestrowanych przez dwa przetworniki ciśnienia PT – 5261, umieszczone jak na rys 5.2b.

Główną zaletą walcarki LUW – 2 jest możliwość łatwego jej przebrojenia do realizacji procesów tak WKR jak i WPK. Do procesu WKR można stosować te same rolki co przy obciskaniu obrotowym, wymienia się tylko szczękę górną na segment klinowy. Natomiast do realizacji procesu WPK w układzie dwóch klinów płaskich wymienia się przekładnię rolkową na dolny suwak narzędziowy napędzany drugim siłownikiem hydraulicznym. Dolny suwak narzędziowy przemieszcza się po prowadnicach (z wałkami) utwierdzonych na płycie dolnej. Aby zsynchronizować ruch przeciwbieżny obu suwaków, sprzęga się je specjalnym układem linowym.



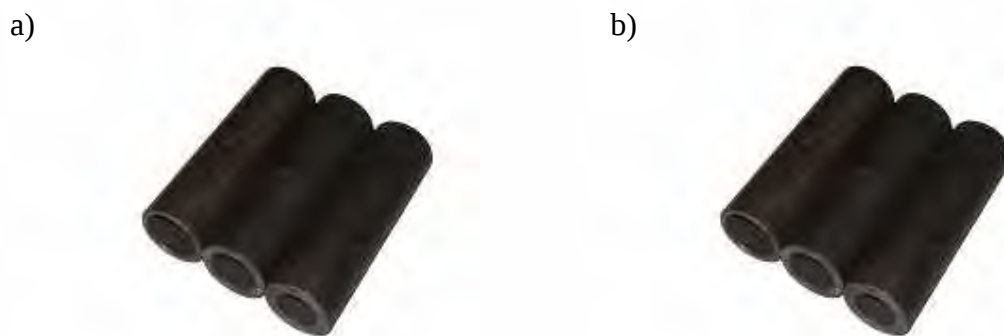
Rys. 5.2. Umieszczenie mierników, umożliwiających wyznaczenie sił w procesie obciskania obrotowego

5.2. Próby kształtowania odkuwek ze stali

5.2.1. Próbki stalowe wykorzystane w badaniach doświadczalnych

Wsady drążone przeznaczone do badań były wykonane z pręta stalowego w gatunku C45 oraz z rury ze stali R35. Pokazano je na rys. 5.3. Próbki ze stali C45 (rys 5.3a) wykonano z pręta o średnicy $\varnothing 25$ mm. Pocięto go na odcinki o długości ok. 80 mm, które następnie poddano wierceniu, aby uzyskać tuleje o trzech różnych grubościach ścianek g_0 , tj. 2 mm, 3 mm i 4 mm. Natomiast próbki ze stali R35 (rys. 5.3b) przygotowano z rur handlowych $\varnothing 25$ mm o trzech grubościach ścianek g_0 równych 2,3 mm; 3,6 mm i 5,3 mm, pociętych na długość ok. 80 mm.

Do badań doświadczalnych wybrano jako materiał próbek stal w gatunku C45, ze względu na to, że jest on najczęściej wykorzystywany przy uruchamianiu nowych procesów WPK. Zatem wybór tego materiału wynika z dużej skali porównawczej do wcześniej wdrożonych procesów technologicznych, bazujących na walcowaniu poprzecznym. Na przykład w praktyce przemysłowej dopiero po opracowaniu kształtowania dla tego gatunku materiału przystępuje się do przystosowania procesu do walcowania innych gatunków stali.



Rys. 5.3. Przykładowe próbki drążone wykonane z: a) pręta ze stali C45, b) rur handlowych ze stali R35

Stal C45 (wg PN-EN 10083-2) jest materiałem konstrukcyjnym, z którego wytwarzane są elementy maszyn i urządzenia średnio obciążone oraz odporne na zużycie, stosowane między innymi w przemyśle maszynowym, energetycznym, samochodowym, np. na:

- koła zębate;
- wrzeciona urządzeń skrawających;
- korbowody;
- tłoczyska;
- wały mimośrodowe i korbowe pras, pomp, silników spalinowych;
- wały turbin, prądnic;
- osie, itp.

Stal ta znalazła także zastosowanie na części, pracujące przy podwyższonych temperaturach do 450°C, takie jak: osie, wały wirnikowe do turbin parowych. Wykonywane są także z niej półprodukty, takie jak: kęsiska, kęsy, pręty, walcówka, blachy, taśmy i odkuwki. Charakteryzuje się ona dobrą skrawalnością, spawalnością, zgrzewalnością i podatnością na cięcie mechaniczne. Ponadto, podatna jest zarówno na obróbkę plastyczną na zimno jak i na gorąco.

Do zweryfikowania analizowanych numerycznie parametrów procesu obciskania obrotowego, przeprowadzono także próby obciskania obrotowego elementów drażonych z zastosowaniem ogólnie dostępnych rur, wykonanych ze stali w gatunku R35.

Stal R35 (wg PN-89/H-84023/07) to materiał stosowany do produkcji rur bez szwu: ogólnego zastosowania przewodowych i konstrukcyjnych, ciągnionych lub walcowanych na zimno, precyzyjnych, kołnierzowych, kielichowych, do budowy statków, do obróbki wiorowej. W formie półproduktów występuje jako rury, blachy, taśmy i walcówka.

Skład chemiczny i własności mechaniczne zastosowanych w badaniach gatunków stali zestawiono w tabelicy 5.1.

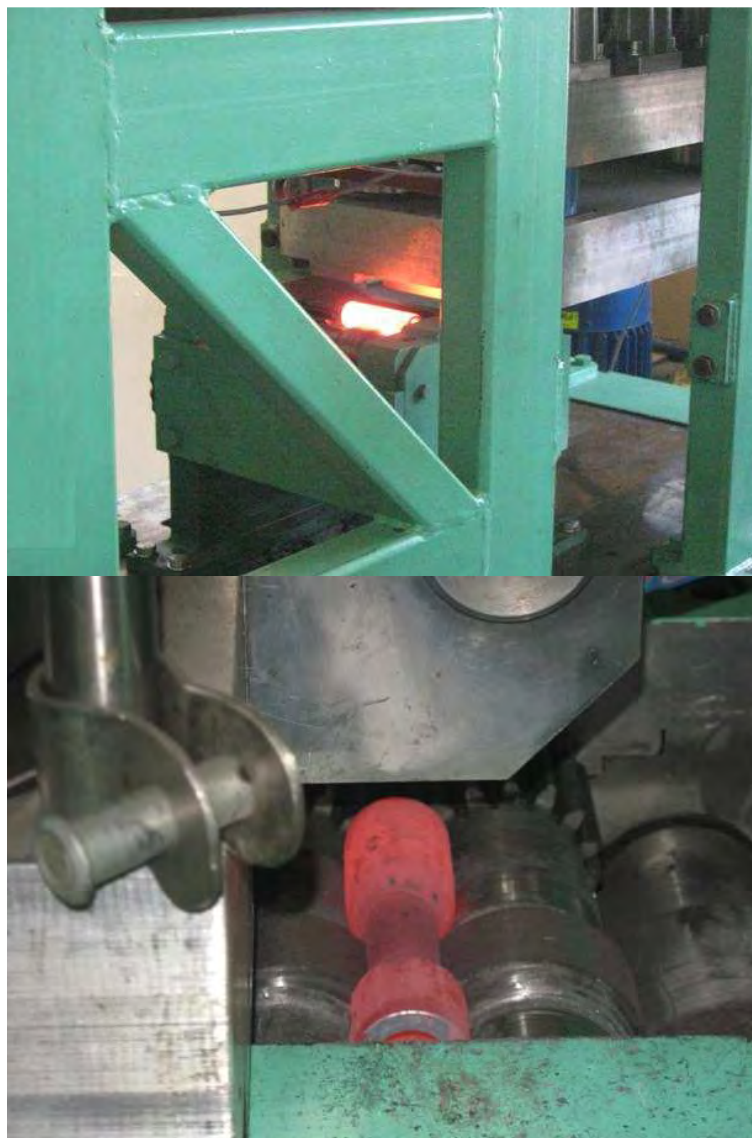
Tablica 5.1

Skład chemiczny oraz własności mechaniczne zastosowanych w badaniach laboratoryjnych gatunków stali

Gat. stali	Skład chemiczny [%]											
	C		Mn		Si		P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
	min	max	min	max	min	max	max	max	max	max	max	
C45	0,42	0,50	0,50	0,80	0,17	0,37	0,04	0,04	0,30	0,30	0,30	reszta
R35	0,07	0,16	0,40	0,75	0,12	0,35	0,04	0,04	–	–	0,25	–

Gat. stali	Własności mechaniczne		
	R _m	R _e	A ₅
	MPa	MPa	%
C45	560 ÷ 850	275 ÷ 490	14 ÷ 17
R35	345	235	25

W badaniach doświadczalnych przyjmowano parametry procesu obciskania (wymiary próbek, stopień gniotu, temperatura) takie jak w obliczeniach numerycznych opisanych w poprzednim rozdziale. Jeden ze zrealizowanych na gorąco procesów obciskania zilustrowano na fotografiach, pokazanych na rys. 5.4.



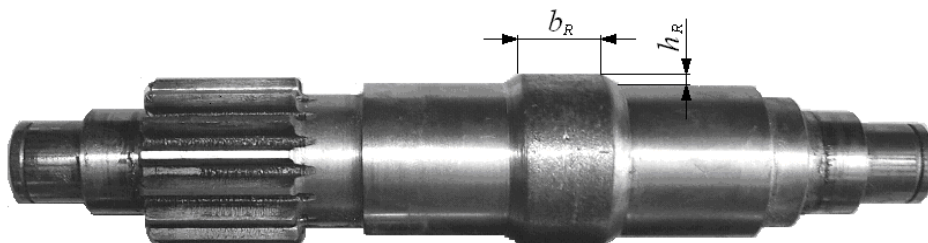
Rys. 5.4. Przykładowy proces obciskania obrotowego na gorąco

5.2.2. Zakres badań doświadczalnych

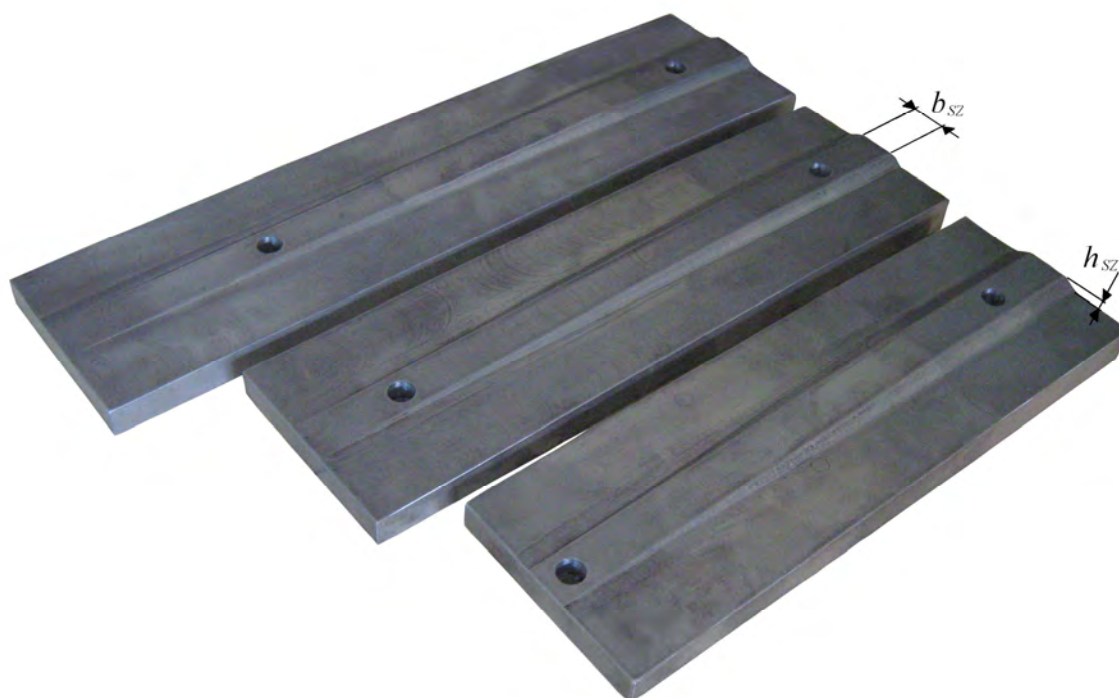
W badaniach doświadczalnych wykorzystano narzędzia w postaci dwóch jednakowych rolek profilowych oraz trzech szczęk płaskich, pokazanych na rysunku 5.5. W celu ograniczenia kosztów wykonania narzędzi wykorzystano

rolki profilowe stosowane w procesach walcowania klinowo-rolkowego. Konieczne było tylko wykonanie szczęk górnych, których szerokość b_{sz} i wysokość h_{sz} była równa przyjętej w rolkach profilowych.

a)



b)



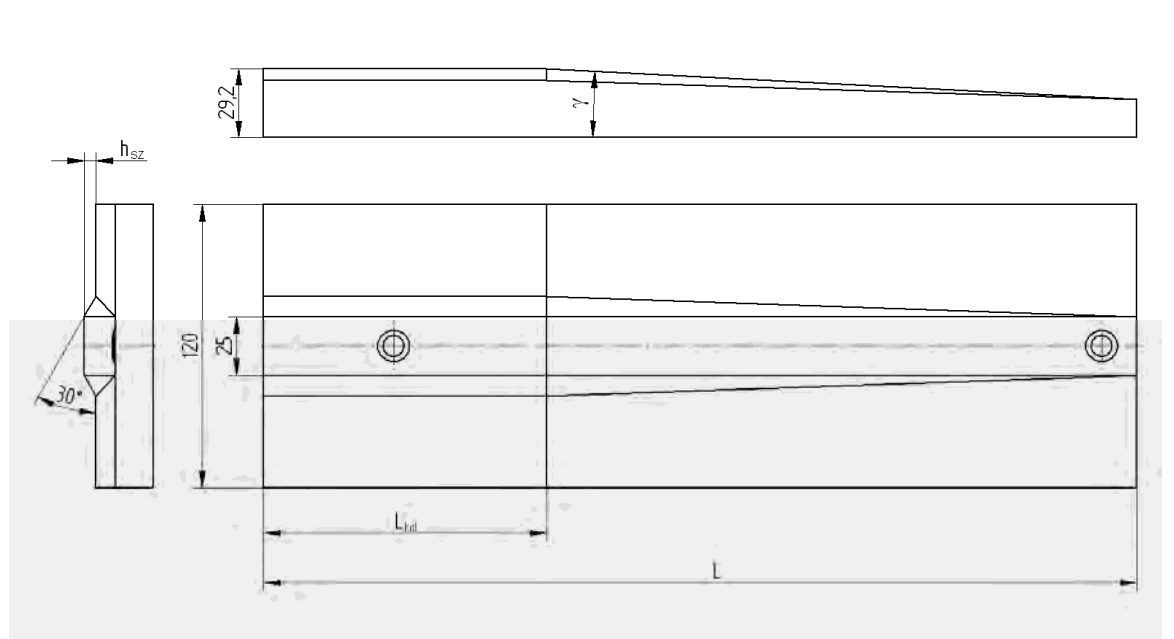
Rys. 5.5. Narzędzia stosowane w badaniach doświadczalnych procesów obciskania obrotowego: a) rolka profilowa, b) szczęki płaskie

Natomiast kąty wzniosu powierzchni kształtujących szczęk dobrano na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Główne wymiary narzędzi (szczęk płaskich) zestawiono w tablicy 5.2.

Tablica 5.2

Główne parametry szczęk płaskich zastosowanych w badaniach obciskania obrotowego

Lp.	γ [°]	h_{sz} [mm]	L_{kal} [mm]	L [mm]
1.	2,00	5	120	480
2.	2,50	5	120	410
3.	3,00	5	120	370

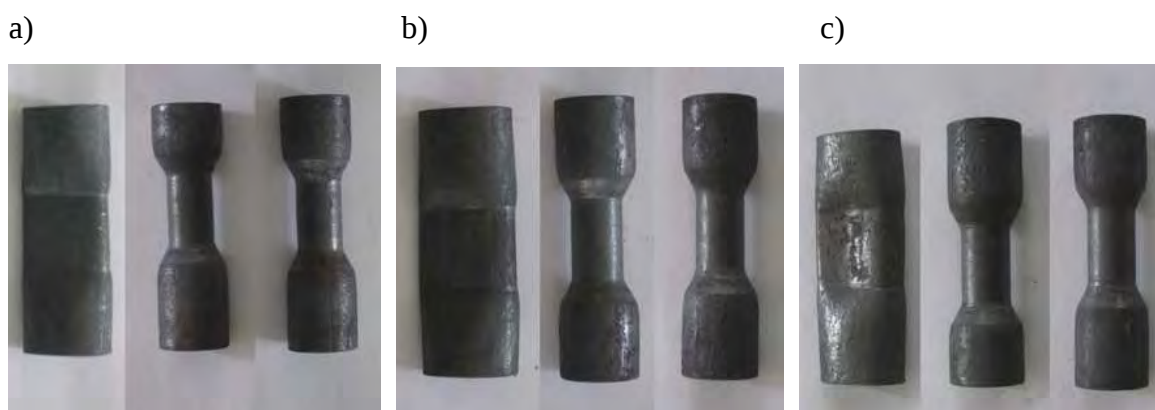


Materiał wyjściowy przeznaczony do obciskania, umieszczano we wcześniej nagrzanym do temperatury 1150°C piecu komorowym. Wsady te wygrzewano przez ok. 10 min., następnie za pomocą szczypiec nagrzane próbki przenoszono do walcarki i kładziono na rolkach, włączano napęd suwaka górnego i realizowano proces obciskania. Gotowe wyroby odkładano na płytę walcarki w celu ich ostudzenia na powietrzu, po czym poddawano je znakowaniu. Oznakowane wyroby drążone poddawano dalszej analizie, w czasie której m.in. określano wady kształtu, wykonywano przekroje wzdłużne oraz dokonywano pomiarów kształtu.

Na rys. 5.6 pokazano próbki ze stali C45 po obciskaniu realizowanym z prędkością liniową szczęki $v_{sz} = 0,10$ m/s oraz prędkością kątową rolek $\omega_R = 3,77$ rad/s. W badaniach doświadczalnych określano głównie wpływ kąta

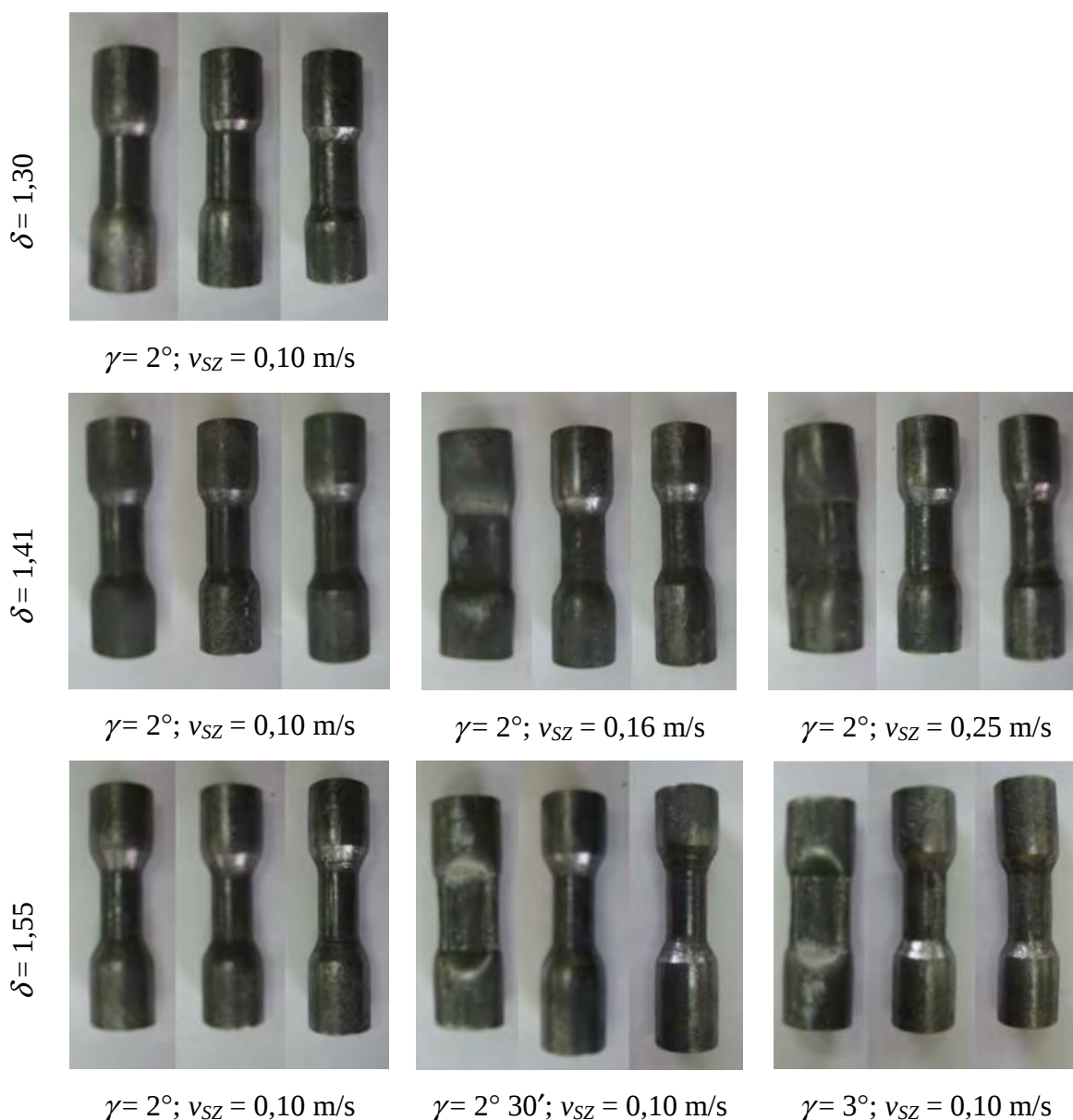
wzniosu γ na przebieg procesu oraz na jakość wykonania ukształtowanych wyrobów drążonych.

Dla wsadu z $g_0 = 2$ mm podczas obciskania wystąpił poślizg, co w konsekwencji doprowadziło do zgniecenia próbek. W pozostałych przypadkach tj. dla g_0 równego 3 mm i 4 mm proces kształtowania przebiegał stabilnie (uzyskano zakładany kształt przewężenia w centralnej strefie próbek).



Rys. 5.6. Próbkę ze stali C45 charakteryzowane przez $g_0 = 2$ mm, 3 mm, 4 mm (od lewej) uzyskane w procesach obciskania obrotowego, przy kątach wzniosu: a) $\gamma = 2^\circ$; b) $\gamma = 2^\circ 30'$; c) $\gamma = 3^\circ$

Dla przypadku kształtowania próbek ze stali R35, analizowano wpływ trzech parametrów (stopnia gniotu δ , prędkości liniowej szczęki v_{sz} i kąta wzniosu γ) na stabilność procesu oraz na jakość wykonania próbek, które pokazano na rysunku 5.7. Badania doświadczalne realizowano tak samo jak dla próbek wykonanych ze stali C45. W przypadku zmiany stopnia gniotu, przy najmniejszej prędkości v_{sz} i najmniejszym kącie γ nie stwierdzono żadnego zakłócenia stabilności przebiegu procesu kształtowania. Zwiększenie prędkości v_{sz} spowodowało poślizg i zgniecenie próbek wykonanych z wsadu o $g_0 = 2,3$ mm. Również przy największej zastosowanej prędkości liniowej szczęki także w próbce z g_0 równym 3,6 mm stwierdzono dużą owalizację przekroju poprzecznego. Natomiast zmiana kąta γ z 2° na $2^\circ 30'$ skutkowałą poślizgiem i zgnieceniem próbki o najmniejszej grubości ścianki wsadu, a przy największym kącie wzniosu następował poślizg już na początku strefy kalibrowania szczęki płaskiej.

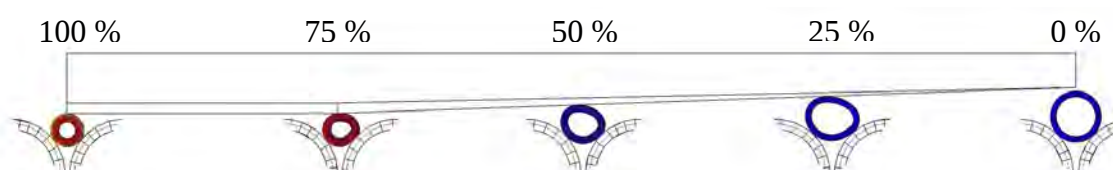


Rys. 5.7. Próbkę ze stali R35 odkształcone w procesach obciskania obrotowego na gorąco z wsadów o grubości ścianek 2,3 mm; 3,6 mm i 5 mm (od lewej)

5.2.3. Uzyskane wyniki

W trakcie badań zauważono, że obciskaniu próbki towarzyszy deformacja przekroju poprzecznego, która powinna być usuwana w strefie kalibrowania (rys. 5.8). Podczas procesu obciskania powierzchnia kształtująca szczęki obniża się co umożliwia redukcję średnicy w części przewężonej. Na początku materiał ulega stopniowemu rozwalcowaniu, które usuwane jest w efekcie obrotu przedmiotu obrabianego, wymuszonego przez poruszające się narzędzia. W miarę

zaawansowania procesu następuje stopniowy wzrost grubości ścianki. W połowie procesu (50%) widoczne jest jak materiał wypychany jest nad rolkę prawą przez szczękę. Nadmiar tego materiału decyduje o stabilności całego procesu. W trakcie badań zauważono, że przy zaawansowaniu procesu 50% ÷ 75% próbka może utracić zdolność do wykonywania obrotu. Zjawisko to występowało przede wszystkim przy obciskaniu wsadu z $g_0 = 2 \text{ mm}$, wówczas próbki uległy zgnieceniu. W strefie kalibrowania prawidłowo przebiegającego procesu (gdy nie doszło do zaniechania ruchu obrotowego) usuwane są wady kształtu.

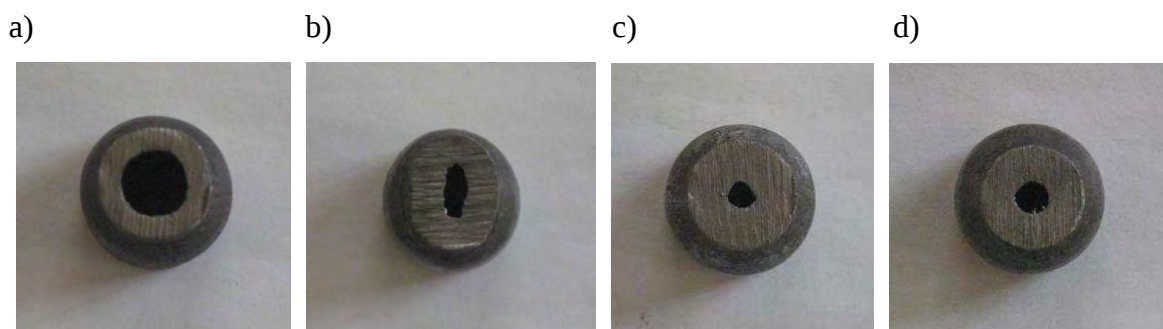


Rys. 5.8. Przykładowy przebieg procesu obciskania obrotowego (obliczony MES) przedstawiający zmiany kształtu przekroju poprzecznego w obszarze przewężenia

Zbyt mała długość strefy kalibrowania jest powodem powstawania wad kształtu w przekroju poprzecznym wyrobu finalnego. W trakcie badań zauważono możliwość tworzenia wad kształtu w przekroju poprzecznym wyrobu drażonego, takich jak: „kwadratowość” – w przedmiotach o małej grubości ścianki; owalność – powstała przy zastosowaniu dużej prędkości liniowej szczęki płaskiej; deformacja powierzchni wewnętrznej – występująca w elementach o dużej grubości ścianki wsadu. Ta ostatnia wada powstaje, gdyż powierzchnia otworu w wyrobie jest swobodna podczas procesu kształtowania. Można jej zapobiegać stosując trzpień. Wady te zilustrowano na rysunku 5.9, na którym zamieszczono także przekrój próbki uznany za poprawny.

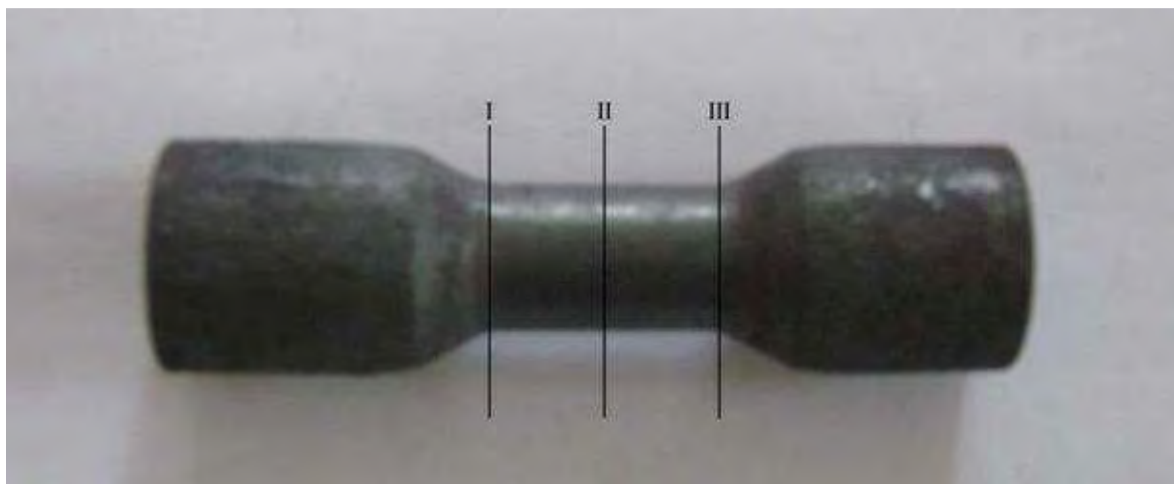
W tablicy 5.3 zestawiono wartości średnic minimalnych i maksymalnych zmierzone w przekrojach poprzecznych przewężenia, usytuowanych jak na rys. 5.10. W celu lepszej czytelności dokładności wykonania odkuwek wprowadzono zależność na różnicę Δd wartości średnic, która ma postać

$$\Delta d = d_{\max} - d_{\min} . \quad (5.1)$$



Rys. 5.9. Przekroje poprzeczne wyrobów finalnych ze stali R35 z odnotowanymi wadami kształtu: a) przekrój w przybliżeniu kwadratowy, b) przekrój owalny, c) deformacja powierzchni wewnętrznej oraz d) przekrój prawidłowy

W tablicy zamieszczono wyniki pomiarów dla próbek ze stali C45, otrzymane z obliczeń numerycznych oraz uzyskane z prób doświadczalnych. Stwierdzono, że zwiększenie kąta γ wpływa na wzrost różnicy Δd . Jest to wynikiem skrócenia strefy kształtowania, powodującego bardziej intensywne odkształcanie obciskanego stopnia odkuwki.



Rys. 5.10. Przekroje określające miejsce pomiaru średnic

Należy jednak zauważyć, że analizowana metoda kształtowania pozwala na uzyskanie wyrobu o dużej dokładności wykonania, gdyż największa odnotowana różnica średnic równa jest 0,2 mm. Mniejszą dokładność wykonania uzyskano w obliczeniach numerycznych, w których największa różnica Δd wyniosła 0,42 mm.

Odnotowane wartości Δd mieszczą się zatem granicach naddatku na dalszą obróbkę skrawaniem.

Ponadto porównując wartości średnic zmierzonych w trzech strefach można zauważyć niepożądaną beczkowatość kształtowanych przewężeń. Zjawisko to wynika z większej deformacji II przekroju poprzecznego, w porównaniu do stref I i III, i związane jest z mniejszą sztywnością odkuwki w części środkowej kształtowanego przewężenia.

Tablica 5.3

Wartości minimalne i maksymalne średnic d [mm], w trzech przekrojach poprzecznych, wyznaczone z obliczeń MES oraz z badań doświadczalnych

Badany zestaw		I			II			III		
		d_{min}	d_{max}	Δd	d_{min}	d_{max}	Δd	d_{min}	d_{max}	Δd
$g_0 = 2 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ$	dośw	Zgniecenie próbki								
	MES									
$g_0 = 3 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ$	dośw	16,10	16,20	0,10	16,15	16,30	0,15	16,10	16,15	0,05
	MES	16,23	16,44	0,21	16,34	16,53	0,19	16,25	16,38	0,13
$g_0 = 4 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ$	dośw	16,15	16,20	0,05	16,30	16,35	0,05	16,15	16,20	0,05
	MES	16,21	16,33	0,12	16,23	16,40	0,17	16,15	16,39	0,24
$g_0 = 2 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ 30'$	dośw	Zgniecenie próbki								
	MES									
$g_0 = 3 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ 30'$	dośw	15,85	15,90	0,05	15,95	16,00	0,05	15,75	15,85	0,10
	MES	16,13	16,34	0,21	16,2	16,34	0,14	16,13	16,37	0,24
$g_0 = 4 \text{ mm}$ $\gamma = 2^\circ 30'$	dośw	15,80	15,90	0,10	15,95	16,00	0,05	15,85	15,90	0,05
	MES	16,22	16,39	0,17	16,22	16,37	0,15	16,21	16,30	0,09
$g_0 = 2 \text{ mm}$ $\gamma = 3^\circ$	dośw	Zgniecenie próbki								
	MES									
$g_0 = 3 \text{ mm}$ $\gamma = 3^\circ$	dośw	15,85	16,05	0,20	15,95	16,10	0,15	15,95	16,00	0,05
	MES	16,18	16,40	0,22	16,22	16,44	0,22	16,12	16,38	0,26
$g_0 = 4 \text{ mm}$ $\gamma = 3^\circ$	dośw	15,95	16,00	0,05	16,00	16,15	0,15	15,90	16,00	0,10
	MES	16,07	16,48	0,41	16,09	16,46	0,37	16,06	16,48	0,42

W ramach badań doświadczalnych dokonano również oceny możliwości walcowania elementów drążonych kształtowanych z wsadów (rur) ogólnodostępnych na rynku. W badaniach tych zbadano wpływ: kąta γ , stopnia gniotu δ , prędkości liniowej v_{sz} na dokładność wykonania wyrobu. Uzyskane rezultaty przedstawiono w tablicy 5.4.

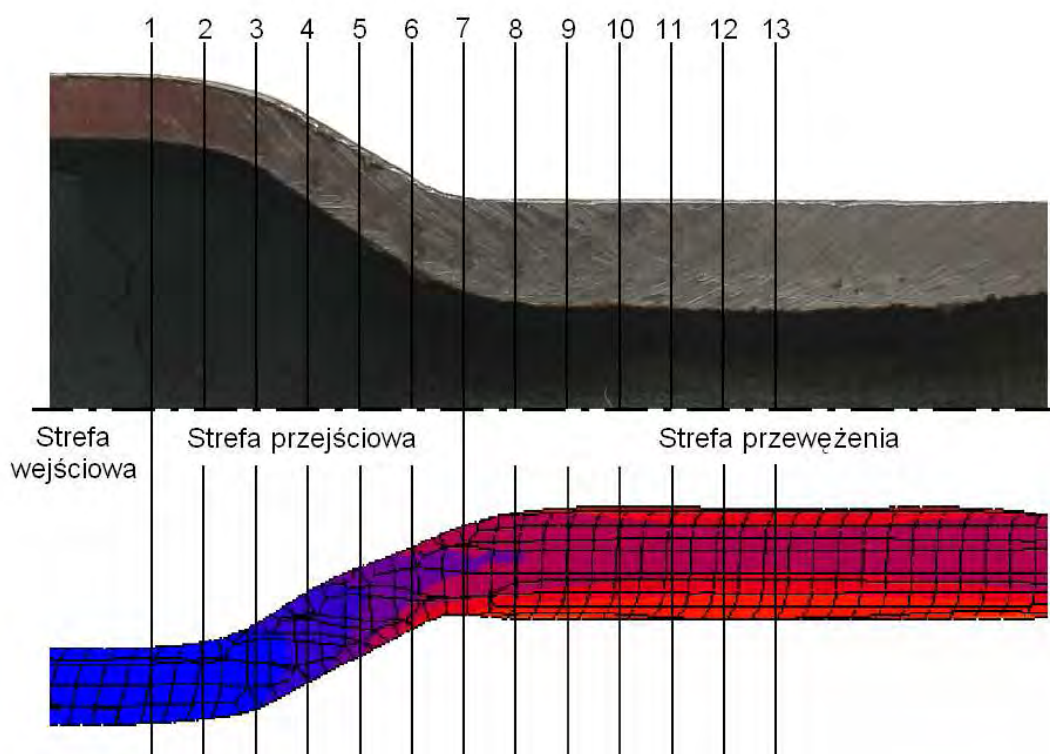
Tablica 5.4

Wartości minimalne i maksymalne średnic d [mm], w trzech przekrojach poprzecznych, zmierzone dla próbek otrzymanych w badaniach doświadczalnych

γ [°]	δ	v_{sz}	g_0	I			II			III		
		[m/s]	[mm]	d_{min}	d_{max}	Δd	d_{min}	d_{max}	Δd	d_{min}	d_{max}	Δd
2	1,30	0,10	2,3	18,65	19,40	0,75	18,55	19,35	0,80	18,20	18,65	0,45
			3,6	19,15	19,35	0,20	19,35	19,40	0,05	19,25	19,35	0,10
			5	19,20	19,30	0,10	19,35	19,45	0,10	19,25	19,40	0,15
2	1,41	0,10	2,3	17,20	17,95	0,75	17,20	17,95	0,75	17,15	18,10	0,95
			3,6	17,45	18,15	0,70	17,50	18,20	0,70	17,55	18,10	0,55
			5	17,55	17,65	0,10	17,80	18,10	0,30	17,65	17,95	0,30
2	1,41	0,16	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			3,6	17,55	17,70	0,15	17,50	17,70	0,20	17,45	17,60	0,15
			5	17,55	17,75	0,20	17,55	17,75	0,20	17,60	17,80	0,20
2	1,41	0,25	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			3,6	14,95	19,00	4,05	14,85	19,10	4,25	14,85	19,05	4,20
			5	16,95	18,10	1,15	16,85	18,75	1,90	17,10	18,25	1,15
2	1,55	0,10	2,3	16,10	16,30	0,20	16,15	16,30	0,15	16,10	16,20	0,10
			3,6	16,05	16,45	0,40	16,45	16,60	0,15	16,30	16,60	0,30
			5	16,10	16,35	0,25	16,20	16,35	0,15	16,00	16,20	0,20
2,5	1,55	0,10	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			3,6	15,80	16,00	0,20	15,90	16,15	0,25	15,85	15,95	0,10
			5	15,70	15,95	0,25	15,80	16,00	0,20	15,70	15,95	0,25
3	1,55	0,10	2,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			3,6	16,20	18,20	2,00	16,25	18,90	2,65	16,30	18,00	1,70
			5	16,80	16,85	0,05	16,65	17,15	0,50	16,10	16,80	0,70

Zastosowanie trzech szczęk różniących się kątem γ pozwoliło stwierdzić, że gdy kąt ten równy jest 2° to można realizować proces obciskania nawet dla próbek wykonanych z wsadu o $g_0 = 0,092d_0$ (równe 2,3 mm). Należy zauważyć, że do tej pory w typowych procesach WPK i WKR ograniczenie dla grubości wsadu wynosiło $0,2d_0$. Jednak stosowanie większych kątów γ powodowało zgniecenie wyrobu, a przy największym kącie wzniosu, równym 3° następował także poślizg pod koniec procesu. Dodatkowo biorąc pod uwagę Δd jakość wykonania wyrobu o ścianie najcieńszej może być niezadowalająca, ze względu na zbyt dużą wartość tego parametru dochodzącą do 0,95 mm. Dokładność wykonania takich próbek można będzie zwiększyć wydłużając strefę kalibrowania szczęk.

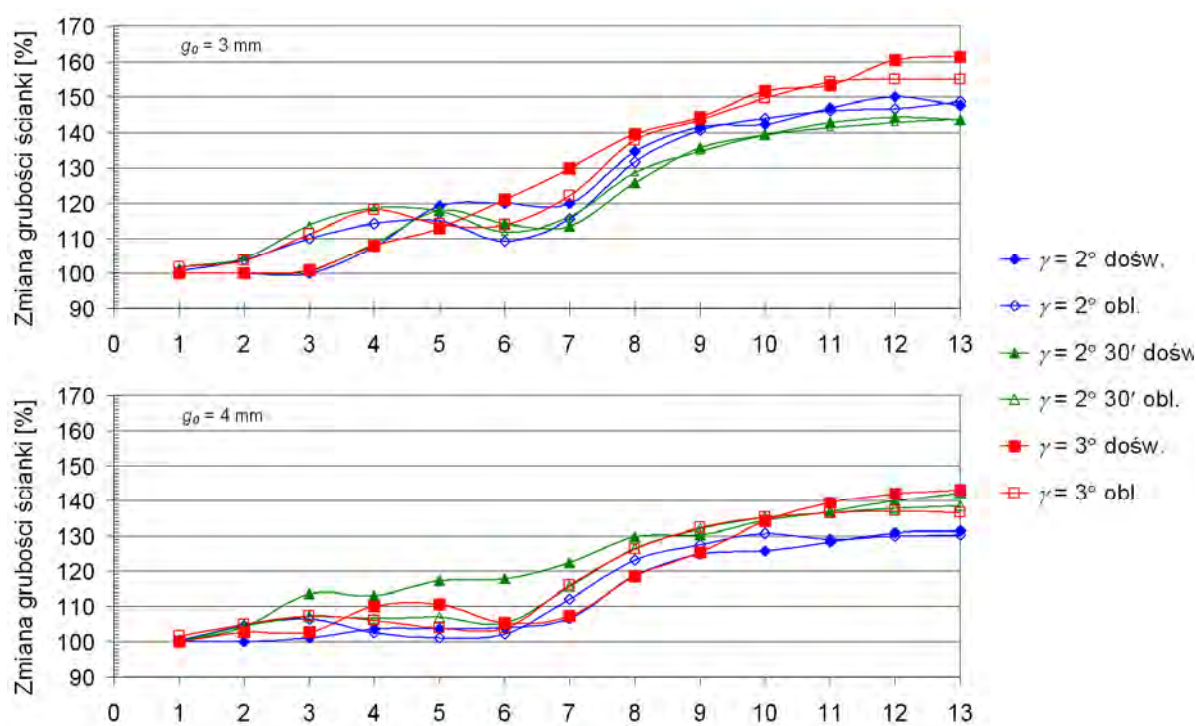
Na uwagę zasługuje wpływ prędkości narzędzi na przebieg obciskania. W analizowanych procesach prędkość kątowa rolek ω_R równa była 3,77 rad/s, a zmianie poddawano prędkość liniową szczęki v_{sz} , w wyniku czego występowała różnica prędkości liniowych na styku szczeka-wsad i rolka-wsad. Po zwiększeniu prędkości v_{sz} odnotowano występowanie pogorszenia jakości obciskanego przedmiotu (przy $v_{sz} = 0,16$ m/s wystąpiło zgniecenie wsadu o $g_0 = 2,3$ mm, a przy największej prędkości równej 0,25 m/s następował wzrost różnicy Δd do wartości powyżej 1,1 mm).



Rys. 5.11. Strefy wyróżnione w odkuwce otrzymanej w badanym procesie obciskania

Na rys. 5.11 pokazano przekrój wzdłużny próbki, podzielony na trzy strefy, na którym zaznaczono przekroje oznaczające miejsca, gdzie dokonano pomiaru grubości ścianki. Ponieważ w strefie wejściowej nie odnotowano znaczącej zmiany grubości ścianki ostatecznie pomiarów dokonywano w strefach przejściowej oraz przewężenia.

Jak wynika z rys. 5.12 odkształceniu ulegał materiał, w strefach przejściowej i przewężenia. Nie odnotowano tamże pocienienia ścianki, co ma niewątpliwie pozytywny wpływ na właściwości wytrzymałościowe tak uzyskanych próbek. Stwierdzono, że przy $g_0 = 3$ mm wzrost kąta γ powodował zwiększenie grubości ścianki, co wynikało z ograniczenia płynięcia obwodowego materiału, które z kolei powodowało intensywniejsze płynięcie promieniowe. Ponadto zauważono, że na procentowy przyrost grubości ścianki ma wpływ grubość g_0 wsadu, dla mniejszej grubości uzyskiwano większy przyrost procentowy. Wynika to z ograniczonego płynięcia promieniowego występującego przy większej grubości g_0 , gdzie zauważalna (już przy $g_0 = 4$ mm) jest większa deformacja powierzchni wewnętrznej. Przy większych kątach γ odnotowano przyrost g na podobnym poziomie.

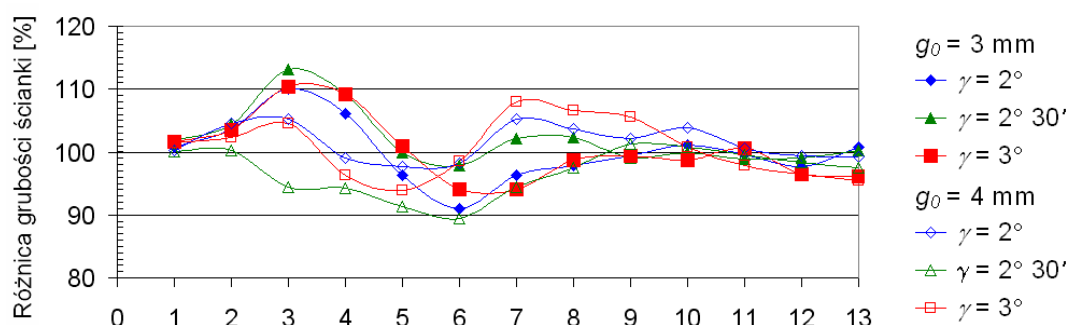


Rys. 5.12. Rozkłady grubości ścianek odkuwek ze stali C45, w przekrojach oznaczonych zgodnie z rys. 5.11

Dla weryfikacji dokładności przeprowadzonych obliczeń numerycznych, wykonano zestawienia parametru Δ_g , uzależnionego od wartości grubości ścianki obliczonej MES g_{MES} i zmierzonej $g_{doś.}$. Przyjęto, że:

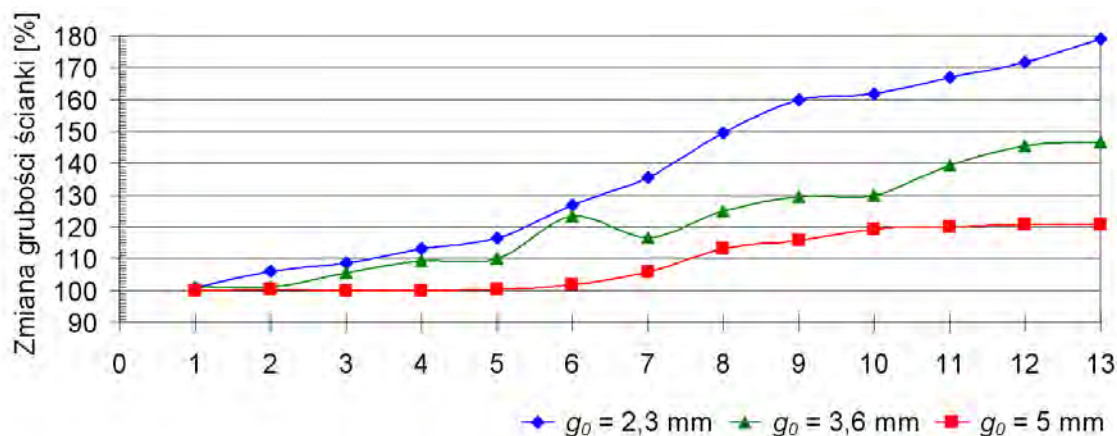
$$\Delta_g = \frac{g_{MES}}{g_{doś}} \cdot 100\% . \quad (5.2)$$

Obliczone w ten sposób dane zamieszczono na rys. 5.13. Analiza ich wykazuje, że największą zgodność wyników uzyskano dla próbki kształtowanej szczęką z kątem $\gamma = 2^\circ$. Największe różnice między wartościami obliczonymi i zmierzonymi nie przekroczyły 13 %. Rysunek 5.13 ilustrujący różnice grubości ścianek obliczonych numerycznie względem uzyskanych z badań doświadczalnych, wskazuje na przydatność MES w analizach procesów obciskania obrotowego.



Rys. 5.13. Stosunek grubości ścianek wyznaczonych w obliczeniach MES do zmierzonych doświadczalnie, dla odkuwek ze stali C45

Wpływ grubości g_0 wsadu na ostateczną grubość ścianki po obciskaniu dobrze widoczny jest na rys. 5.14. Widać, że ze zwiększeniem g_0 występuje mniejszy procentowy przyrost grubości ścianki.



Rys. 5.14. Rozkłady grubości ścianek odkuwek ze stali R35 po procesie obciskania obrotowego

Dla $g_0 = 2,3$ mm przyrost maksymalny wyniósł ok. 79 %, a dla $g_0 = 5$ mm tylko 21 %. Przy największej grubości g_0 występowało utrudnione płynięcie promieniowe materiału, spowodowane osiągnięciem małej średnicy wewnętrznej otworu w odkuwce, co powodowało zwiększone płynięcie materiału w kierunku osiowym.

5.3. Próby kształtowania odkuwek z metali nieżelaznych

W celu obniżenia masy zespołu w budowie maszyn często stosuje się części wykonane z metali nieżelaznych (lekkich). Szczególne znaczenie ma to w przemyśle lotniczym oraz w kosmonautyce. Do grupy metali lekkich należą m.in. tytan i aluminium. Głównymi zaletami tytanu i jego stopów są bardzo dobre własności wytrzymałościowe, zarówno w temperaturze otoczenia jak i podwyższonej. Stopy aluminium posiadają najmniejszą gęstość z wymienionych materiałów oraz charakteryzują się dobrymi własnościami wytrzymałościowymi przy posiadanej gęstości. W tabelicy 5.5 zestawiono wymienione powyżej materiały wraz z wybranymi własnościami w celu ich porównania.

Tablica 5.5

Zestawienie głównych właściwości wybranych materiałów [35]

Własności	Wybrane materiały			
	tytan	stopy tytanu	stopy aluminium	stale
Gęstość ρ [$\times 10^3$ kg/m ³]	4,51	3,9÷4,9	2,6÷2,8	~7,86
Granica plastyczności R_e [MPa]	140÷500	400÷1400	120÷400	200÷2000
Moduł Younga E [$\times 10^3$ MPa]	110	80÷140	70÷76	210
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	460÷590	460÷1400	200÷600	300÷1800

Stop tytanu Ti6Al4V (wg ASTM B265 Grade 5) należy do grupy metali lekkich, charakteryzuje się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi, przy

gęstości mniejszej (ok. 4420 kg/m³) w porównaniu do gęstości stali (ok. 7860 kg/m³).

Ten stop tytanu jest najpopularniejszym materiałem, który znalazł zastosowanie w przemyśle lotniczym i kosmicznym, motoryzacyjnym (wykonywane są części do samochodów Formuły 1) [35]. Stop Ti6Al4V posiada strukturę dwufazową $\alpha+\beta$ charakteryzuje się dobrą plastycznością oraz dobrą odpornością na korozję i działanie wody morskiej. Skład chemiczny i własności mechaniczne tego materiału zestawiono w tablicy 5.6.

Tablica 5.6

Skład chemiczny [%] oraz własności mechaniczne zastosowanych w badaniach laboratoryjnych stopu Ti6Al4V

Skład chemiczny [%]							
C	Fe	N ₂	O ₂	Al	V	H ₂	Ti
max	max	max	max			max	
0,1	0,40	0,05	0,20	5,5÷6,75	3,5÷4,5	0,015	reszta

Własności mechaniczne		
R _m	R _e	A ₅
MPa	MPa	%
890÷1400	800÷1100	10

Stop aluminium EN AW-6061 (wg PN-EN 573-3 1998) na rynku dostępny jest w postaci: rur cienkościennych, prętów i innych standardowych profili wyciskanych. Główne zastosowanie ma on w przemyśle lotniczym, stoczniowym i motoryzacyjnym [8, 54].

Wykonywane są z niego elementy, takie jak:

- podzespoły statków powietrznych i samolotów,
- wyposażenie morskie,
- transportu,
- ramy rowerowe,
- obiektywy aparatów fotograficznych,
- napędowe,

- złącza i osprzęt elektryczny,
- hamulcowe,
- hydrauliczne (zawory).

Skład chemiczny i własności mechaniczne tego materiału przedstawia tablica 5.7.

Tablica 5.7

Skład chemiczny [%] oraz własności mechaniczne zastosowanych w badaniach laboratoryjnych stopu aluminium EN AW-6061

Skład chemiczny [%]									
Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Cr	inne	Al
		max		max	max	max		max	
0,8÷1,2	0,4÷0,8	0,7	0,15÷0,4	0,25	0,15	0,15	0,04÷0,35	0,15	reszta

Własności mechaniczne			
Stan materiału	R _m	R _e	A ₅
	MPa	MPa	%
O	110÷152	65÷110	14÷16
T1	180	95÷96	16
T4	min 179	min 110	
T6	260÷310	240÷276	13

Ze względu na dużą popularność stopów aluminium 6061 i tytanu Ti6Al4V w zastosowaniu w różnych gałęziach przemysłu, uznano za uzasadnione wykonanie prób obciskania obrotowego próbek z tych materiałów, z zastosowaniem tych samych narzędzi co w próbach kształtowania wsadów ze stali.

Badania doświadczalne wykonane były na walcierce laboratoryjnej LUW – 2 przedstawionej na rys 5.1., którą uzbrojono w narzędzia zastosowane wcześniej do prób kształtowania stali (rys 5.5), co pozwoliło na określenie potencjalnych możliwości wykorzystania technologii obciskania do kształtowania wyrobów z metali lekkich. Do badań wykonano wsady o długości $l_w = 80$ mm i średnicy $\varnothing 25$ mm, grubości ścianki wsadu g_0 wynosiły 3 mm i 4 mm. Procesy kształtowania realizowano na gorąco, gdzie wsady nagrzewano do temperatury 450°C (stop

aluminium 6061) oraz 950°C (stop tytanu Ti6Al4V). Prędkość liniowa szczęki płaskiej wynosiła $v_{sz} = 103$ mm/s, a rolki obracały się z prędkością kątową $\omega_R = 3,77$ rad/s. Podczas obciskania kształtowano przewężenie w części centralnej wsadu, charakteryzowane średnicą $\varnothing 20$ mm. Przykładowe wsady i otrzymane wyroby pokazano na rysunku 5.15.

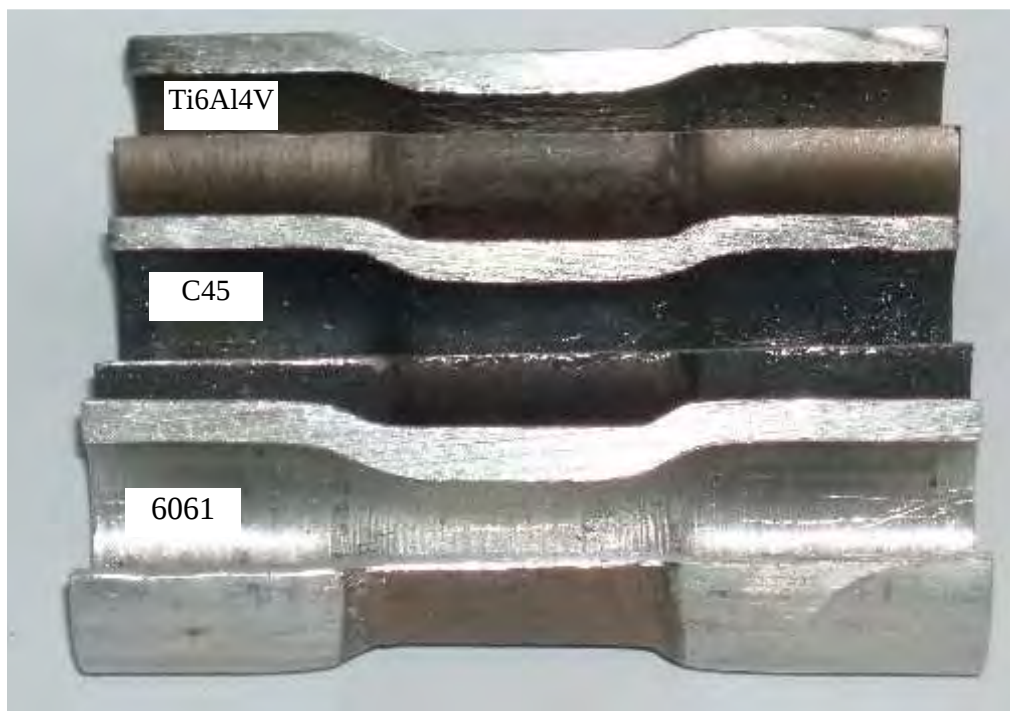


Rys. 5.15. Wsady drążone oraz ukształtowane wyroby wykonane ze stopu aluminium 6061

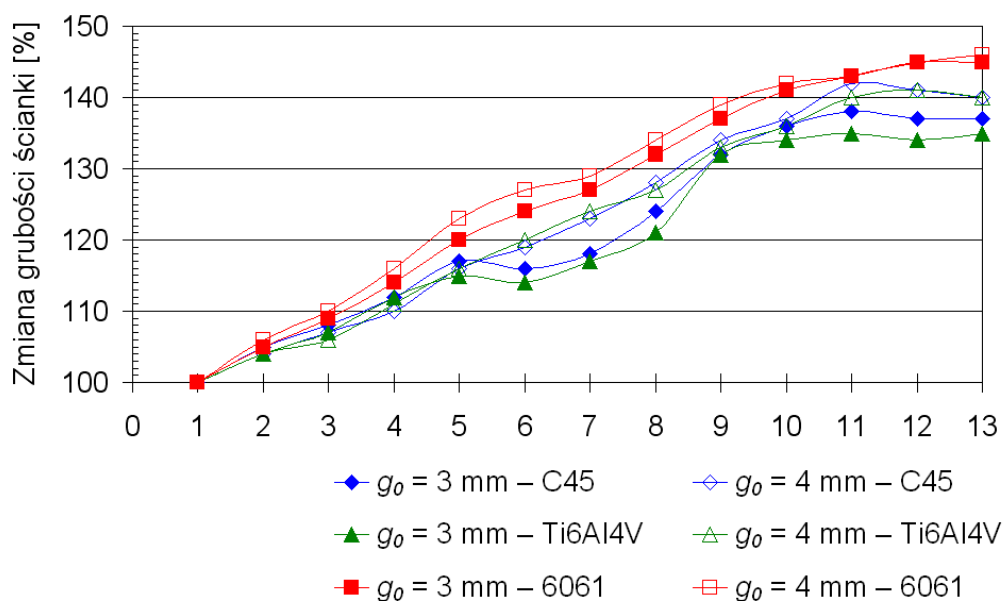
Uzyskane próbki mierzono w celu określenia wielkości błędu kształtu (m.in. odchyłki owalności), przyjmując za prawidłową tolerancję średnicy w zakresie $-0,3 \div +0,6$ mm. Podane odchyłki średnicy przyjęto na podstawie wytycznych (gdzie głównymi parametrami doboru są: masa, trudność materiałowa, wskaźnik zwartości oraz średnica nominalna) odnoszących się do procesu WPK, które w ujęciu tablicowym podane są w pracy [39]. Wyroby spełniające przyjęte kryteria poddano dalszej analizie wymiarowej. W tym celu wykonano przekroje wzdłużne próbek (rys. 5.16) oraz dokonano pomiaru grubości ścianek, w przekrojach jak na rys. 5.11.

Zmierzone w przekrojach wzdłużnych grubości ścianek przedstawiono na rys. 5.17. Na podstawie przeprowadzonej analizy otrzymanych rozkładów grubości ścianek stwierdzono, że dla stali i stopu tytanu zmiana grubości ścianek

ma podobny przebieg (zwiększa się o około $35 \div 40 \%$). Dla próbek z tych materiałów kształtowanych ze wsadu $g_0 = 3 \text{ mm}$ w przekrojach 5-5 $\div$ 9-9 zauważalny jest nierównomierny wzrost grubości ścianek, co nie ma miejsca przy $g_0 = 4 \text{ mm}$.



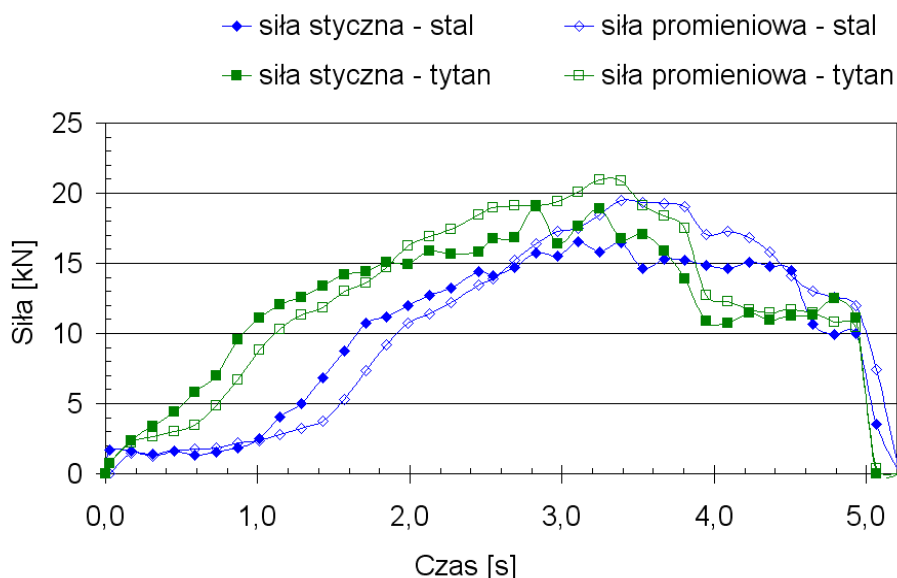
Rys. 5.16. Przekroje wzdłużne badanych próbek otrzymanych z następujących materiałów: C45, 6061 oraz Ti6Al4V



Rys. 5.17. Rozkłady grubości ścianek w przekrojach wzdłużnych badanych wyrobów (C45, 6061 oraz Ti6Al4V)

Pozwala to przepuszczać, że podczas prowadzenia procesu obciskania dla wsadów o większej grubości ścianki występuje właściwa równowaga pomiędzy promieniowym a osiowym płynięciem materiału. Dla stopu aluminium zanotowano większy przyrost grubości ścianki wynoszący około 45 %. W próbkach wykonanych ze stopu aluminium 6061 nie zaobserwowano w/w zaburzeń. Niewielki wpływ g_0 na zmianę grubości ścianki w strefie kształtowanego przewężenia wskazuje na lepsze uplastycznienie tego metalu i predysponuje proces obciskania obrotowego do kształtowania odkuwek drażonych ze stopów aluminium.

W trakcie prowadzonych badań doświadczalnych mierzono siły kształtowania. Przykładowe wartości sił promieniowych i stycznych odnotowane dla stali i stopu tytanu przedstawiono na rys. 5.18. W strefie kształtowania (następuje stopniowa redukcja średnicy) dla obu materiałów występuje wzrost zmierzonych wartości sił, gdzie nieznacznie większa jest siła styczna wynikająca z posuwu szczęki płaskiej.



Rys. 5.18. Rozkłady sił zmierzonych w próbach obciskania obrotowego wyrobów ze stali C45 i stopu Ti6Al4V, $g_0 = 4 \text{ mm}$

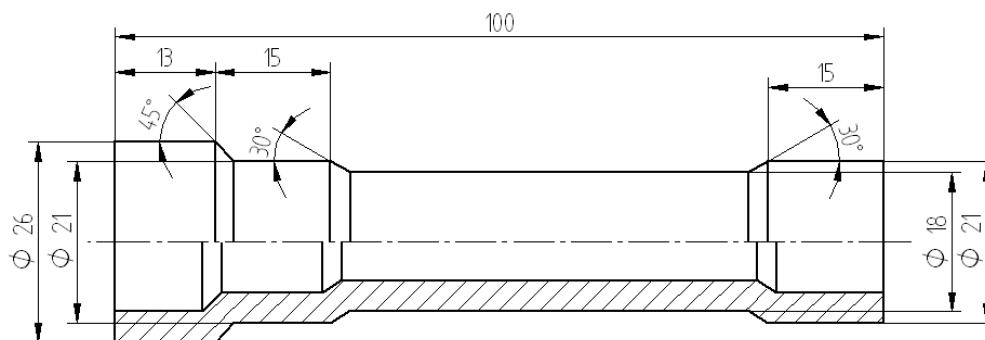
Podczas usuwania wad kształtu w przekroju poprzecznym (w strefie kalibrowania) obie siły maleją, jednakże większe wartości przyjmuje siła promieniowa. Efektywność usuwania wad kształtu uzależniona jest od długości strefy kalibrowania, dlatego analogicznie do procesów WPK i WKR kształtowana odkuwka powinna wykonać w tej fazie procesu $3 \div 3,5$ obrotu.

6. Propozycje zastosowania metody obciskania obrotowego

W rozdziale tym przedstawiono rezultaty przeprowadzonych obliczeń numerycznych przykładowych procesów obciskania obrotowego zaprojektowanych w oparciu o wiedzę zdobytą w trakcie badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej. Zastosowanie symulacji numerycznej do analizy tej metody wykorzystanej do kształtowania elementów o złożonym kształcie, jakimi są stopniowe wałki drążone, pozwoliło zbadać m.in. jak zmienia się grubość ścianki na poszczególnych stopniach odkuwki. Porównanie zastosowania metody obciskania obrotowego i procesu WKR oraz zestawienie jego zalet zostało przedstawione w książce [38], na przykładzie wałka drążonego stosowanego w silniku elektrycznym.

6.1. Odkuwka stopniowanego wałka drążonego

Wałek drążony przedstawiony na rysunku 6.1 wytwarzany jest poprzez obróbkę skrawaniem. Wydaje się, że zaprezentowany wyrób z powodzeniem może być kształtowany metodą obciskania obrotowego. Biorąc pod uwagę uwarunkowania technologiczne w miejscu przejścia średnic z $\varnothing 26$ mm na $\varnothing 21$ mm wprowadzono pochylenie powierzchni 45° . Spowodowane było to możliwością wystąpienia w tym miejscu niewypełnienia wynikającego z zastosowania większych kątów pochylenia.



Rys. 6.1. Odkuwka stopniowanego wałka drążonego

W celu poprawienia stabilności procesu obciskania obrotowego (w tym zrównoważenia sił), zdecydowano, że wykonanie wałka przebiegać będzie w układzie podwójnym z wsadu drażonego o wymiarach: średnica zewnętrzna $\varnothing 26$ mm, długość $l_w = 208$ mm i grubość ścianki $g_0 = 4$ mm. Rozdzielenie uzyskanych wyrobów drażonych będzie realizowane metodami obróbki skrawaniem.

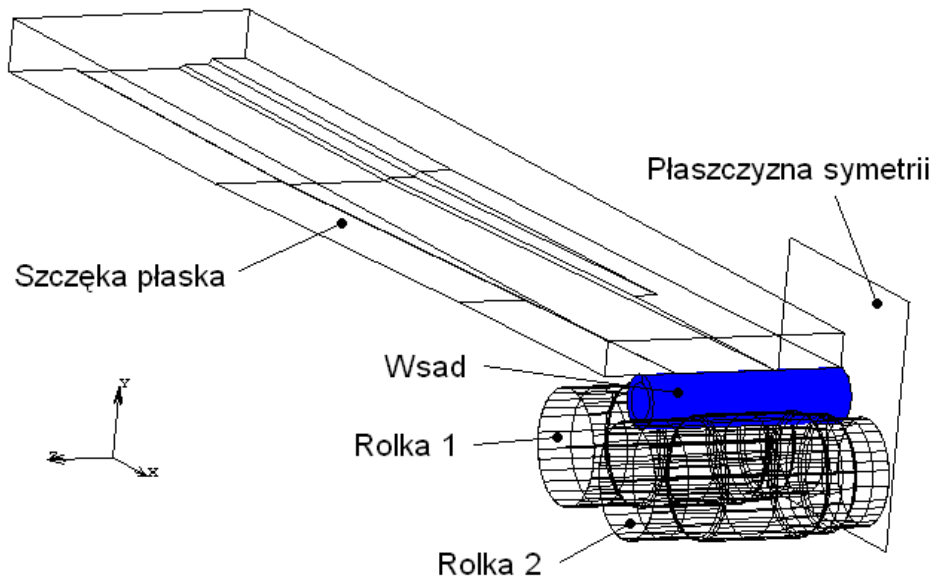
Modele narzędzi kształtujących wykonano w programie CAD Solid Edge v. 20. Schemat procesu obciskania obrotowego z zaprojektowanymi narzędziami pokazano na rysunku 6.2, na którym przedstawiono położenie wsadu względem szczęki płaskiej oraz rolek (z naniesionymi podstawowymi wymiarami).

Obliczenia numeryczne rozważanego procesu obciskania obrotowego przeprowadzono stosując komercyjne oprogramowanie Simufact. Ponieważ odkuwki kształtowane są w układzie podwójnym, w celu skrócenia czasu obliczeń wykonano model MES dla jednej części, wprowadzając płaszczyznę symetrii, jak na rys. 6.3. Do obliczeń przyjęto model materiału, stali C45 z biblioteki programu MES. Założono: prędkość liniową szczęki płaskiej $v = 0,2$ m/s, prędkość kątową rolek $\omega = 6,78$ rad/s, temperaturę początkową wsadu 1100°C , wartość czynnika tarcia $m = 1$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem wsadu a narzędziami 10 kW/m²K, współczynnik wymiany ciepła między materiałem wsadu a otoczeniem $0,3$ kW/m²K, temperaturę otoczenia 30°C i temperaturę narzędzi 150°C .

W wyniku przeprowadzonych obliczeń MES prześledzono zmiany kształtu wałka drażonego, które wraz z intensywnością odkształceń plastycznych, przedstawiono na rys. 6.4. Szczeka płaska została zaprojektowana w ten sposób, że kąt wzniosu poszczególnych powierzchni kształtujących jest taki sam i stopnie o mniejszych redukcjach przekroju kształtowane są już przy zaawansowaniu procesu równym 25 %. Największą intensywność odkształceń plastycznych odnotowano dla stopni kształtowanych przy największych redukcjach przekroju.

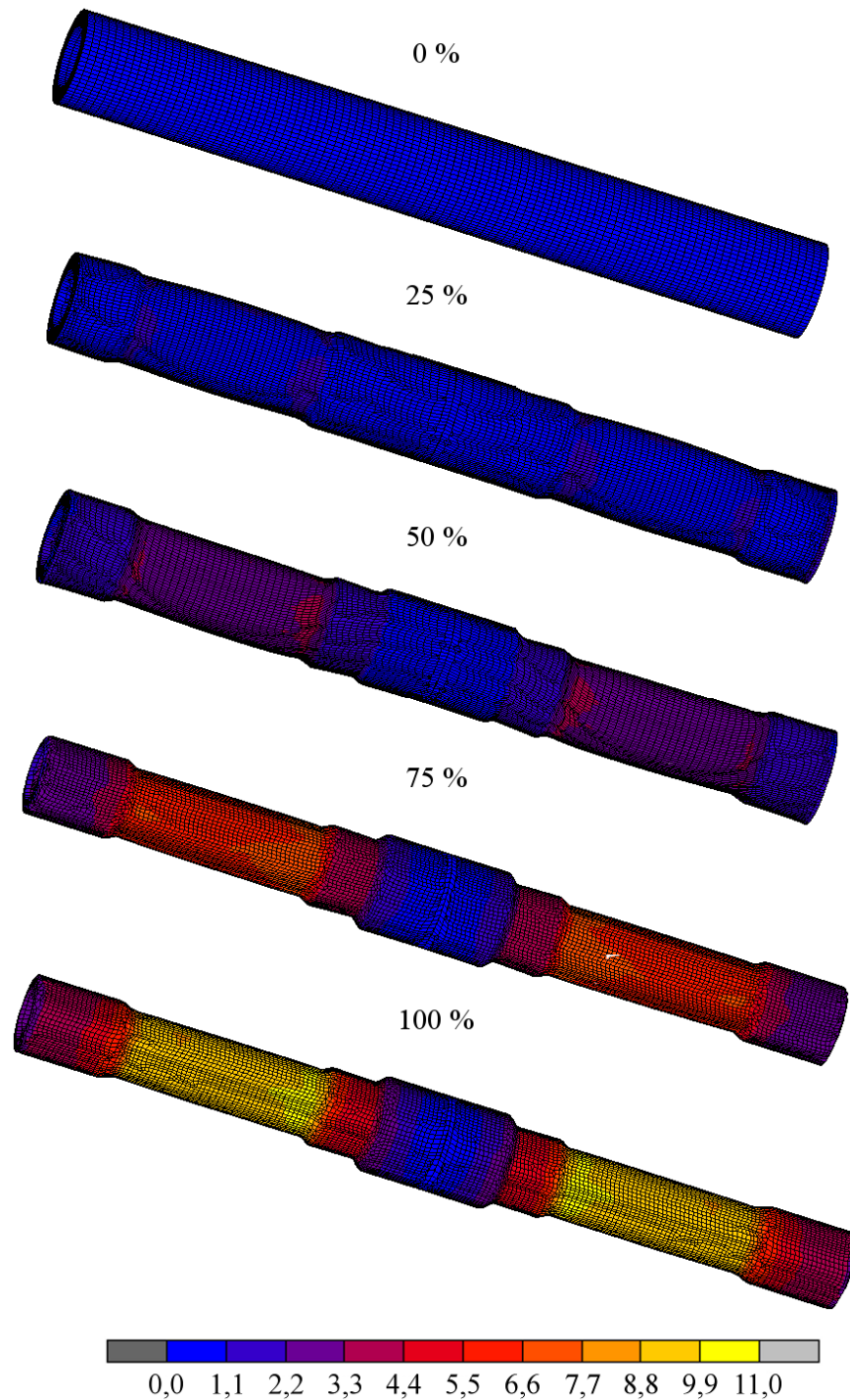


Na uwagę zasługuje fakt, iż odkształcenia w stopniach znajdujących się na końcach wałka nie są równomierne na ich długości. Wynika to z występującego swobodnego osiowego płynięcia materiału.



Rys. 6.3. Model MES procesu obciskania obrotowego stopniowanego wałka drążonego

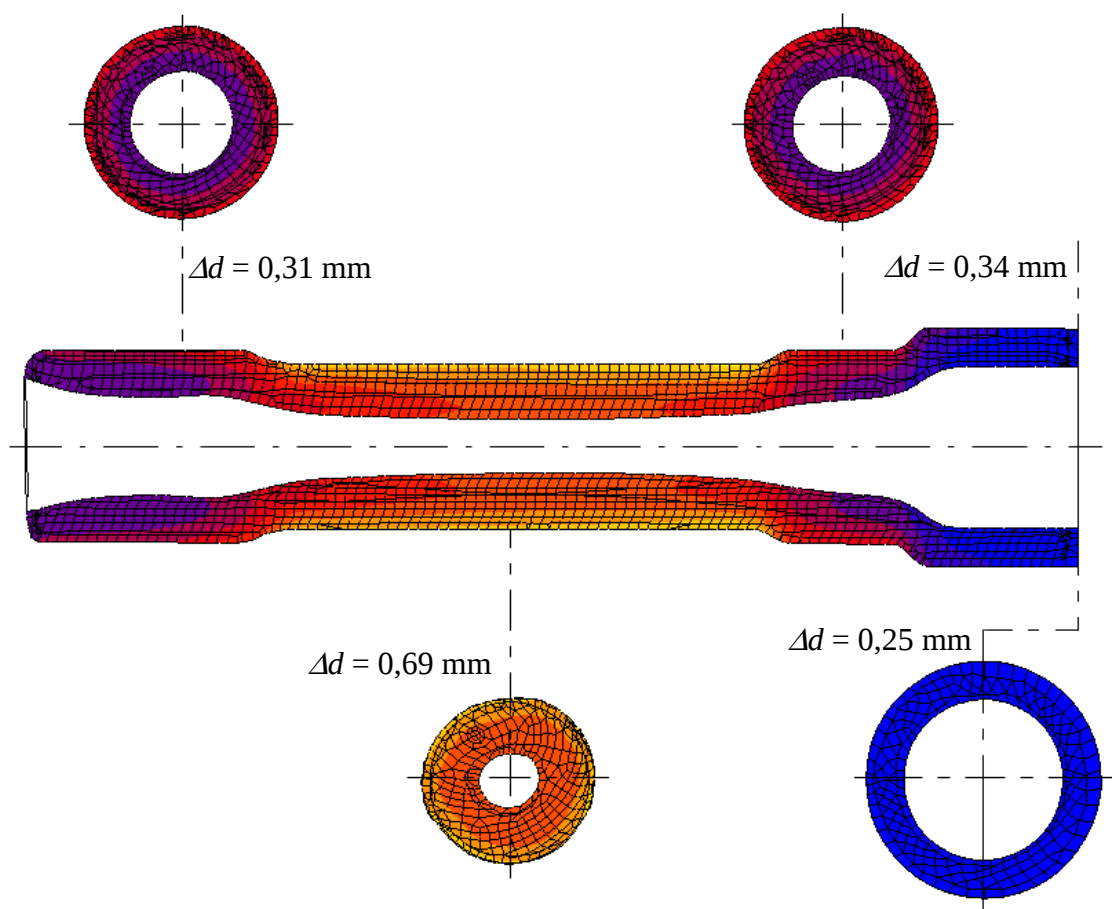
Na podstawie rezultatów z badań doświadczalnych pierwotnie przyjęto kąt wzniosu $\gamma = 2^{\circ} 30'$, który był najbardziej optymalny biorąc pod uwagę długość strefy kalibrowania i kształt przekroju poprzecznego próbki. Jednak podczas kształtowania stopniowanego wałka drążonego przyjęta strefa kalibrowania okazała się za krótka. W efekcie w przekroju poprzecznym stopnia z najmniejszą średnicą wystąpiła zbyt duża wada kształtu ($\Delta d = 1,93$ mm), która nie została usunięta w fazie kalibrowania. Dlatego też zdecydowano na wydłużenie strefy kształtowania, w rezultacie czego kąt γ zmniejszono do $1^{\circ} 30'$. Pozwoliło to na zwiększenie liczby obrotów odkuwki w tej strefie oraz na bardziej równomierne odkształcenie na obwodzie wyrobu drążonego. Na rysunku 6.5 przedstawiono prognozowane przekroje wałka, w których dokonano pomiaru maksymalnych i minimalnych średnic oraz z zależności 5.1 wyliczono różnicę Δd .



Rys. 6.4. Rozkłady intensywności odkształceń w procesie obciskania obrotowego wałka drążonego, przy zaawansowaniu procesu podanym na rysunku

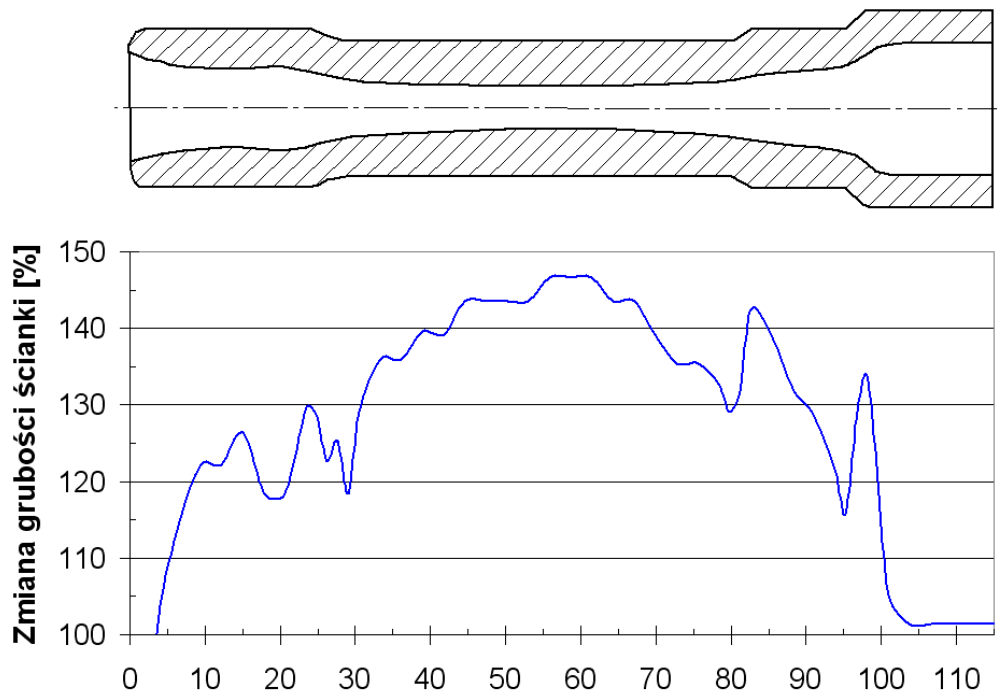
Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że największe wady kształtu w przekroju poprzecznym wystąpiły w stopniu odkuwki o najmniejszej średnicy i spowodowane były największą redukcją przekroju poprzecznego. Jednak wartość Δd mieściła się w zakładanych tolerancjach wykonawczych.

W procesach obciskania obrotowego wałków drążonych ważnym zagadnieniem jest zmiana grubości ścianki. Dla analizowanego przypadku kształtowania wyrobu (rys. 6.6) stwierdzono pocienienie ścianki, które wystąpiło tylko na końcach odkuwki. Jednakże ponieważ obciskany wałek uległ wydłużeniu to należy usunąć odcinki pocienione metodami obróbki skrawaniem. Wobec tego można stwierdzić, że w wałku wystąpiło pogrubienie ścianki, którego wielkość zależała od wielkości stopnia redukcji średnicy.



Rys. 6.5. Przekroje otrzymanego stopniowego wałka drążonego

Największy przyrost grubości ścianki do około 45 % odnotowano w części centralnej stopnia ukształtowanego z największym gniotem. Po raz kolejny potwierdza to, że technologii obciskania obrotowego towarzyszy pogrubienie ścianki wyrobu prowadzące do poprawy jego własności wytrzymałościowych.

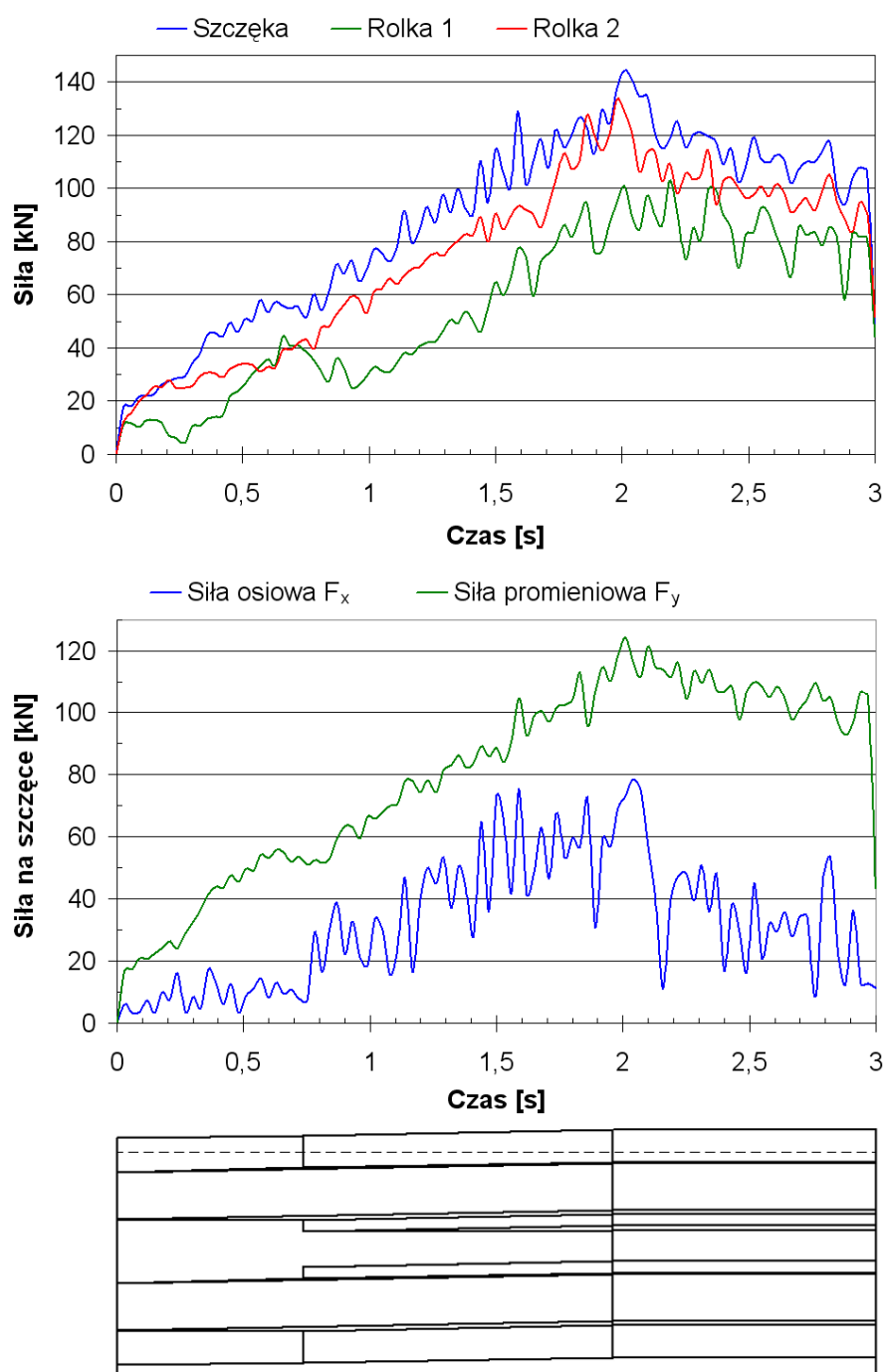


Rys. 6.6. Zmiana grubości ścianki w odkuwce wałka drążonego

Dla określenia możliwości zrealizowania danej technologii kształtowania w konkretnej walcierce niezbędna jest znajomość wartości sił kształtowania. Wiedza ta pozwala na wybór odpowiedniej obrabiarki, która miałaby moc niezbędną do realizacji procesu obciskania.

W wykonanej symulacji MES procesu obciskania obrotowego stopniowanego wałka drążonego obliczano siły działające na poszczególne narzędzia kształtujące. Na rys. 6.7 przedstawiono rozkłady sił kształtujących (oddziałujące na dwie rolki i szczękę płaską) oraz składowych siły oddziałujących na szczękę płaską. Analiza uzyskanych danych wykazała, że poszczególne siły kształtowania proporcjonalnie rosną osiągając wartości maksymalne na końcu fazy kształtowania, po czym podczas kalibrowania siły te zmniejszają się wraz z usuwaną nieregularnością kształtu przekroju poprzecznego obciskanych stopni odkuwki. Należy zauważyć, że pierwotnie przy zastosowaniu większego kąta $\gamma = 2^\circ 30'$ poszczególne siły wzrastały także w strefie kalibrowania, co było efektem wystąpienia zbyt dużej deformacji w kształtowanych stopniach, która nie była skutecznie usuwana w

ostatnim etapie procesu. Największe siły działały na szczękę, a najmniejsze na rolkę 1.



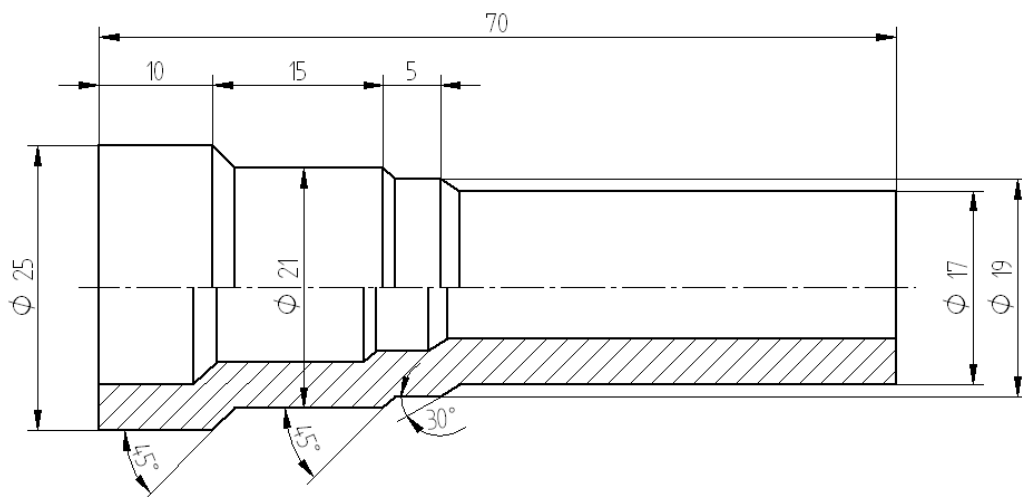
Rys. 6.7. Rozkłady sił występujących w procesie obciskania obrotowego wałka drążonego

Porównując rozkłady składowych siły oddziałującej na narzędzie płaskie stwierdzono, że dominujący udział w procesie obciskania ma siła promieniowa,

odpowiedzialna za obciśnięcie wałka. Zauważyć można także, że różnica pomiędzy składowymi sił ulega zwiększeniu w fazie kalibrowania, gdzie składowa siły osiowej (odpowiedzialna za ruch posuwowy szczęki płaskiej) ulega raptownemu zmniejszeniu.

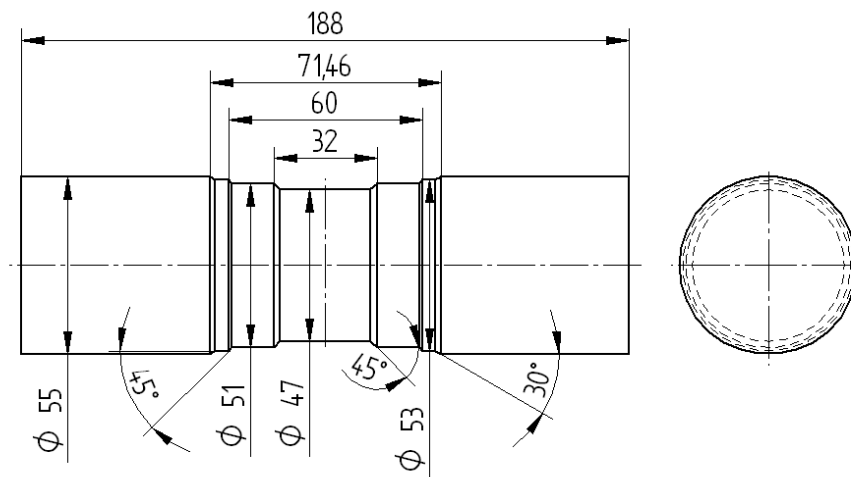
6.2. Odkuwka sworznia drążonego

Kolejnym przykładem możliwości zastosowania metody obciskania obrotowego jest kształtowanie sworznia drążonego przedstawionego na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Odkuwka sworznia drążonego

Na potrzeby symulacji numerycznej procesu obciskania tego wyrobu zaprojektowano narzędzia kształtujące. Na rysunku 6.9 pokazano model rolki, a na rys. 6.10 przedstawiono szczękę płaską. Podobnie jak poprzednio poszczególne narzędzia wykonane były w programie Solid Edge V20, z którego następnie importowano je do oprogramowania MES. Przyjęto, że odkuwka sworznia kształtowana będzie w układzie podwójnym oraz, że stopień niepodlegający redukcji średnicy znajduje się w części centralnej wyrobu. Rozdzielenie ukształtowanych części przeprowadzone ma być w ramach dalszej obróbki skrawaniem.

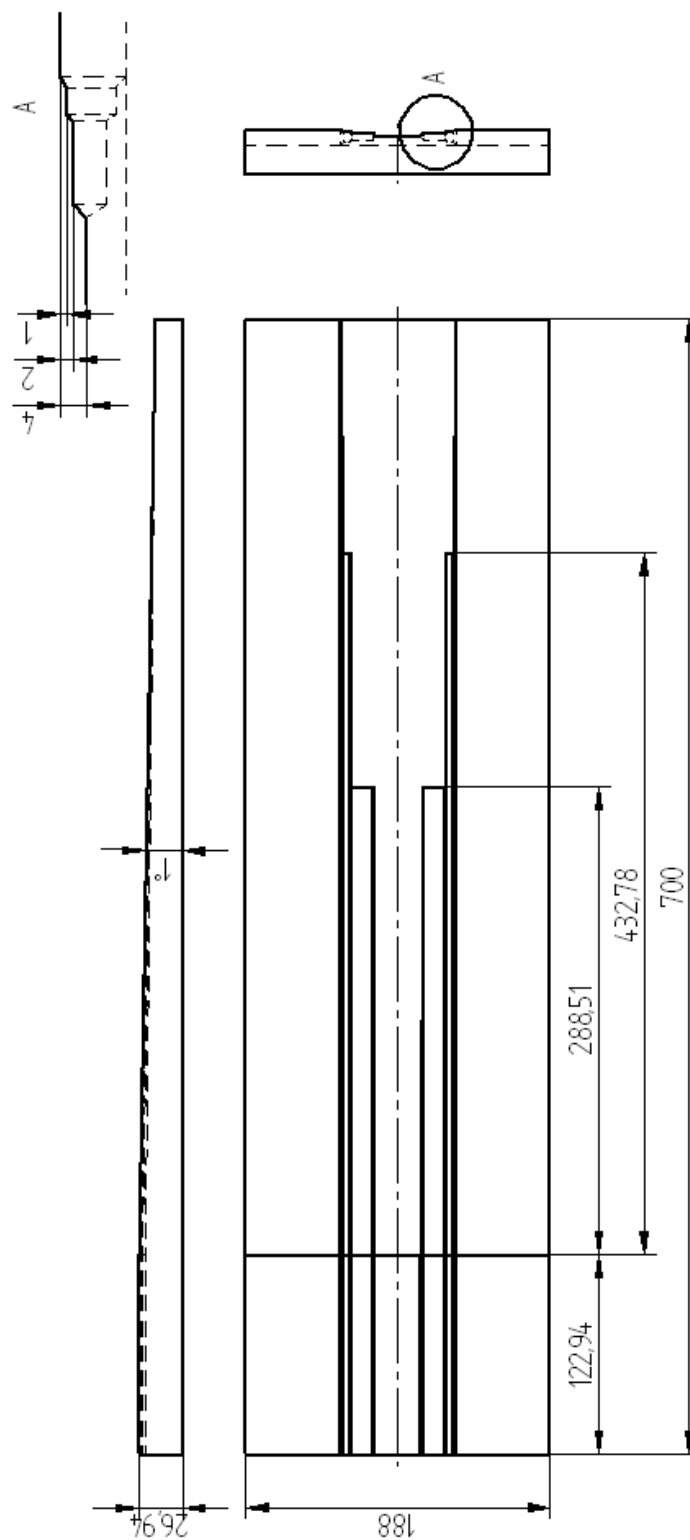


Rys. 6.9. Rolka wykorzystywana w procesie obciskania obrotowego sworznia drążonego kształtowanego w układzie podwójnym

W trakcie wykonywania modelu MES przyjęto, że rozstaw rolek wynosi 57 mm a powierzchnia kalibrowania oddalona jest od osi symetrii rolek o 30,49 mm.

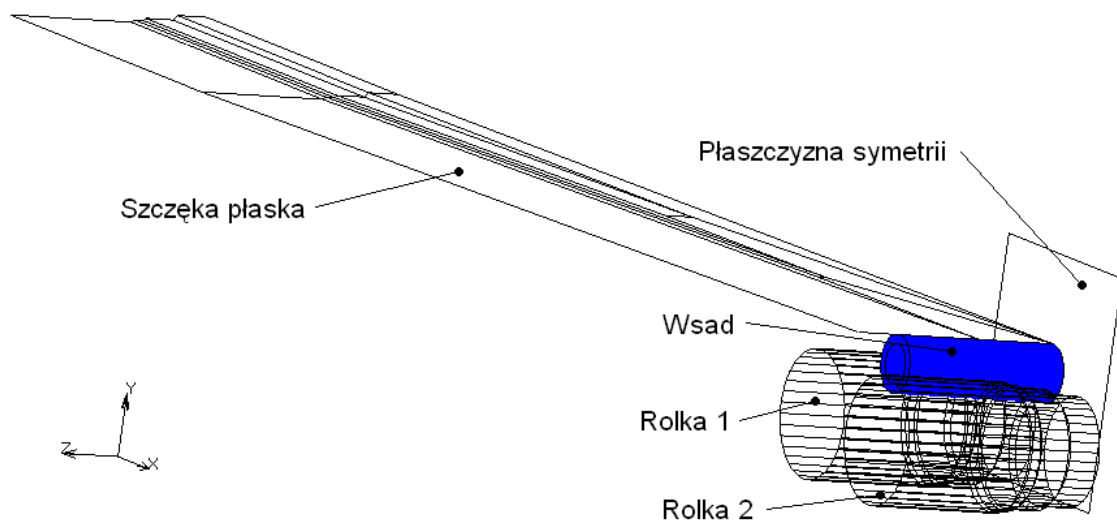
W celu skrócenia czasu obliczeń, do modelu geometrycznego procesu kształtowania wprowadzono płaszczyznę symetrii jak na rys. 6.11, a symulację numeryczną prowadzono dla jednej części. W skład opracowanego modelu wchodzi: wsad, szczeka płaska oraz dwie rolki. Przyjęto, że szczeka górna porusza się z prędkością liniową $v_{sz} = 0,2$ m/s, a rolki obracają się z prędkością kątową $\omega_R = 7,27$ rad/s.

Wartość prędkości ω_R wyznaczono w ten sposób, by prędkość liniowa części cylindrycznych rolek o największej średnicy była równa prędkości v_{sz} szczęki płaskiej. Przyjęto, że wsad stanowi tuleja o wymiarach $\varnothing 25 \times 148$ mm i grubości ścianki równej 4 mm. W obliczeniach przyjęto, że materiałem wsadu jest stal w gatunku C45.



Rys. 6.10. Szczeka płaska stosowana w procesie obciskania obrotowego sworznia drążonego

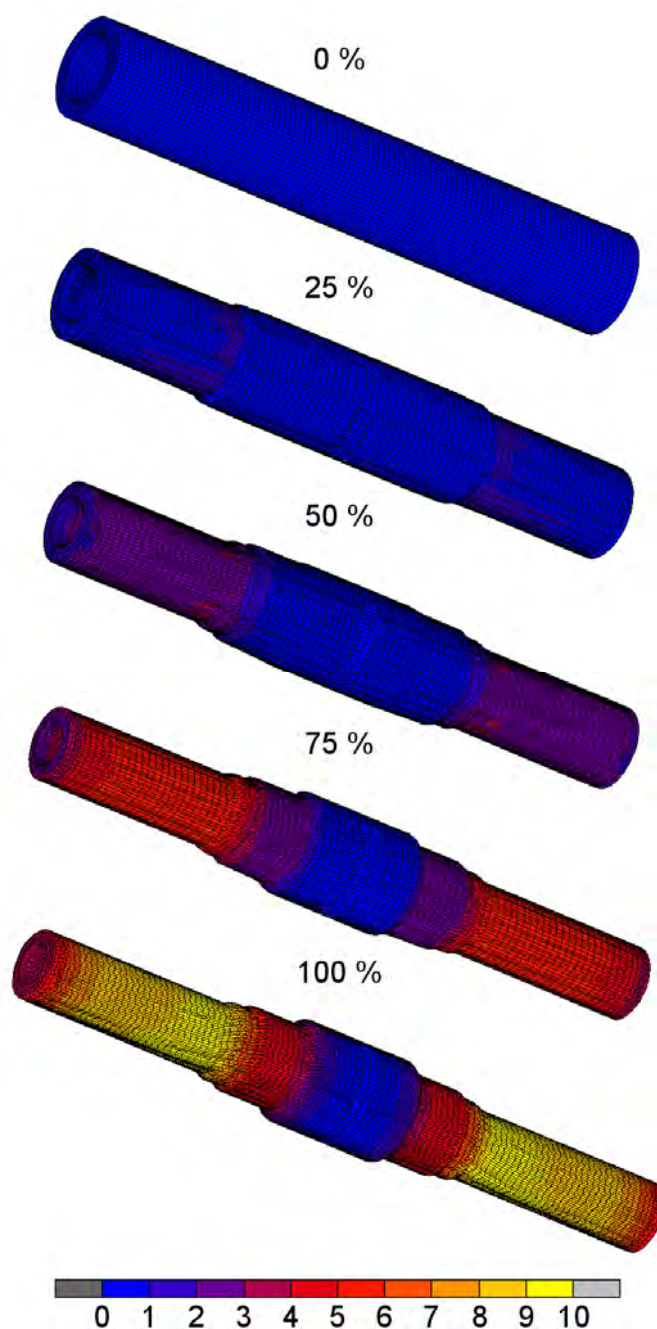
Model materiałowy tej stali wczytano z biblioteki zastosowanego programu MES. Założono, że temperatura początkowa materiału wynosi 1100°C , natomiast temperatura narzędzi kształtujących wynosi 150°C . Poza tym przyjęto: współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziami – $10 \text{ kW/m}^2\text{K}$, współczynnik wymiany ciepła między materiałem a otoczeniem – $0,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$, temperaturę otoczenia równą 30°C oraz wartość czynnika tarcia $m = 1$.



Rys. 6.11. Model MES procesu obciskania obrotowego odkuwki sworznia

Na podstawie wykonanej symulacji procesu obciskania sworznia drążonego dokonano analizy zmiany kształtu odkuwki, którą zilustrowano na rys. 6.12. W początkowej fazie kształtowania szczeka płaska wcina się w materiał wyjściowy obciskając stopnie zlokalizowane na jego końcach. W miarę zaawansowania procesu następuje redukcja średnicy na kolejnych stopniach sworznia. W ostatniej fazie obciskania (w strefie kalibrowania) wszystkie narzędzia mają kontakt z materiałem, na całej długości kształtowanych wyrobów. W tej fazie procesu usuwane są wcześniej powstałe wady kształtu, takie jak deformacja w przekroju poprzecznym i wygięcie wzdłużne wyrobu. Zauważono, że procesowi obciskania towarzyszy niepożądane osiowe płynięcie materiału, które ma wpływ na mniejszy

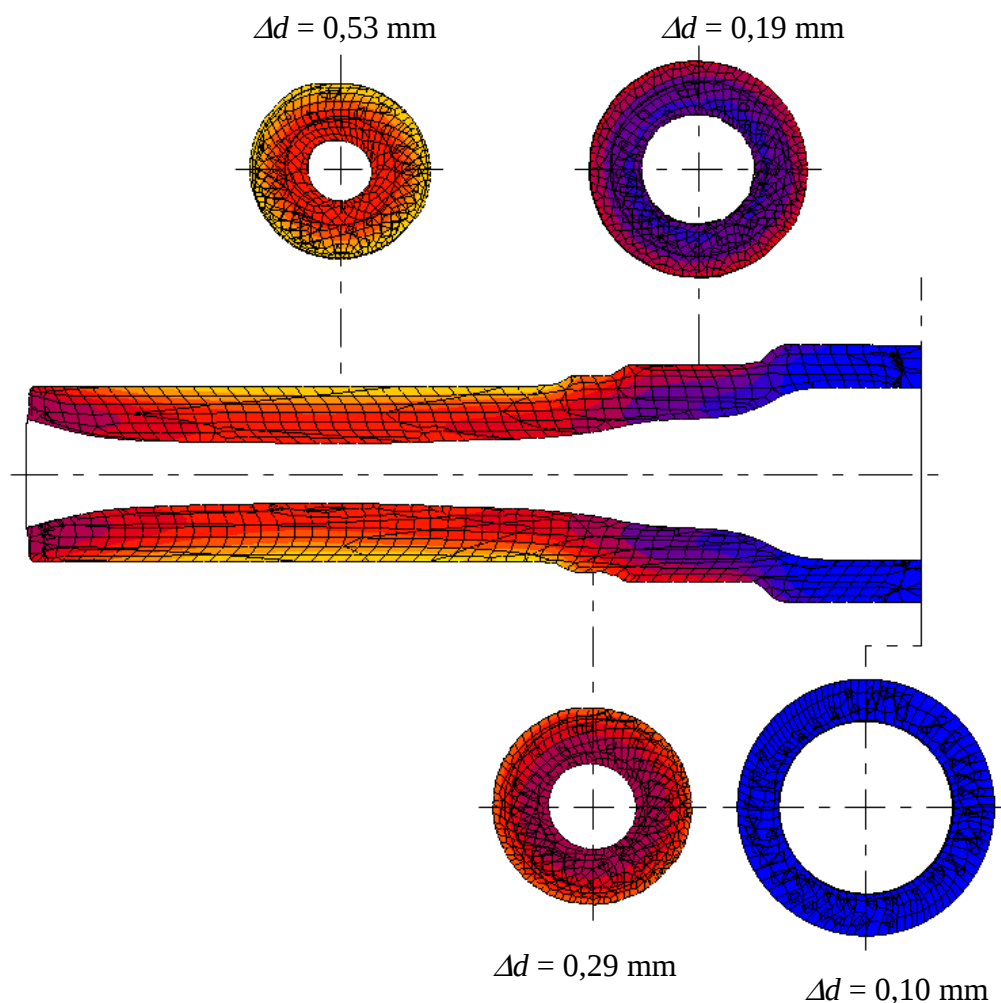
przyrost grubości ścianki. Największe odkształcenia plastyczne zlokalizowane są w stopniach kształtowanych z największą redukcją przekroju.



Rys. 6.12. Rozkłady intensywności odkształceń oraz zmiany kształtu odkuwki sworznia drążonego, prognozowane MES

Rozkłady intensywności odkształcenia dobrze widoczne są w wykonanych przekrojach, przedstawionych na rys. 6.13. Odkształcenia te mają rozkład warstwowy, charakterystyczny dla tego procesu kształtowania. Na rysunku tym

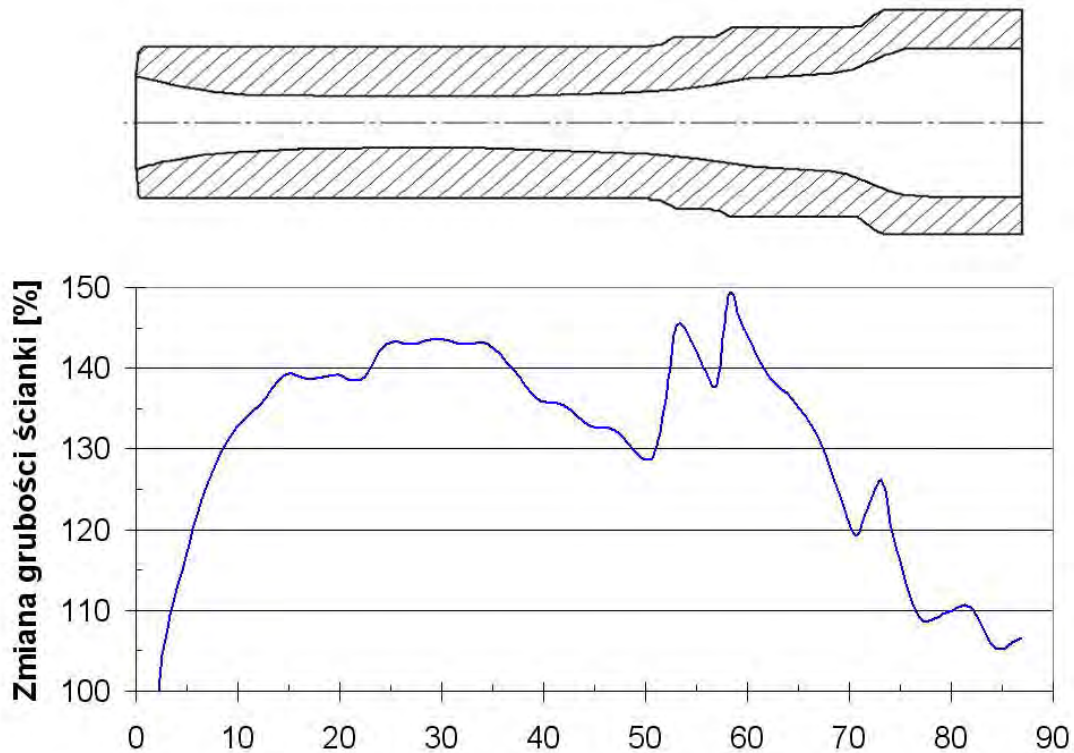
podano także różnice średnic maksymalnych i minimalnych Δd zmierzone dla poszczególnych przekroi poprzecznych. Największą różnicę Δd zanotowano dla stopnia obciskanego przy największej redukcji przekroju, a najmniejszą wartość Δd odnotowano w strefie nieodkształcanej. Należy zauważyć, że wielkości owalizacji uzależnione są od średnicy kształtowanego stopnia odkuwki. Wszystkie te wielkości mieszczą się w tolerancji $-0,3 \div +0,6$ stosowanej w procesach walcowania poprzecznego [39].



Rys. 6.13. Przekroje sworznia drążonego

Na rys. 6.14 przedstawiono jak zmienia się grubość ścianki na długości wyrobu drążonego. Jak wynika z uzyskanych danych pocienienie wystąpiło tylko na końcu odkuwki. Jednak ta część wyrobu będzie odcięta w dalszej obróbce

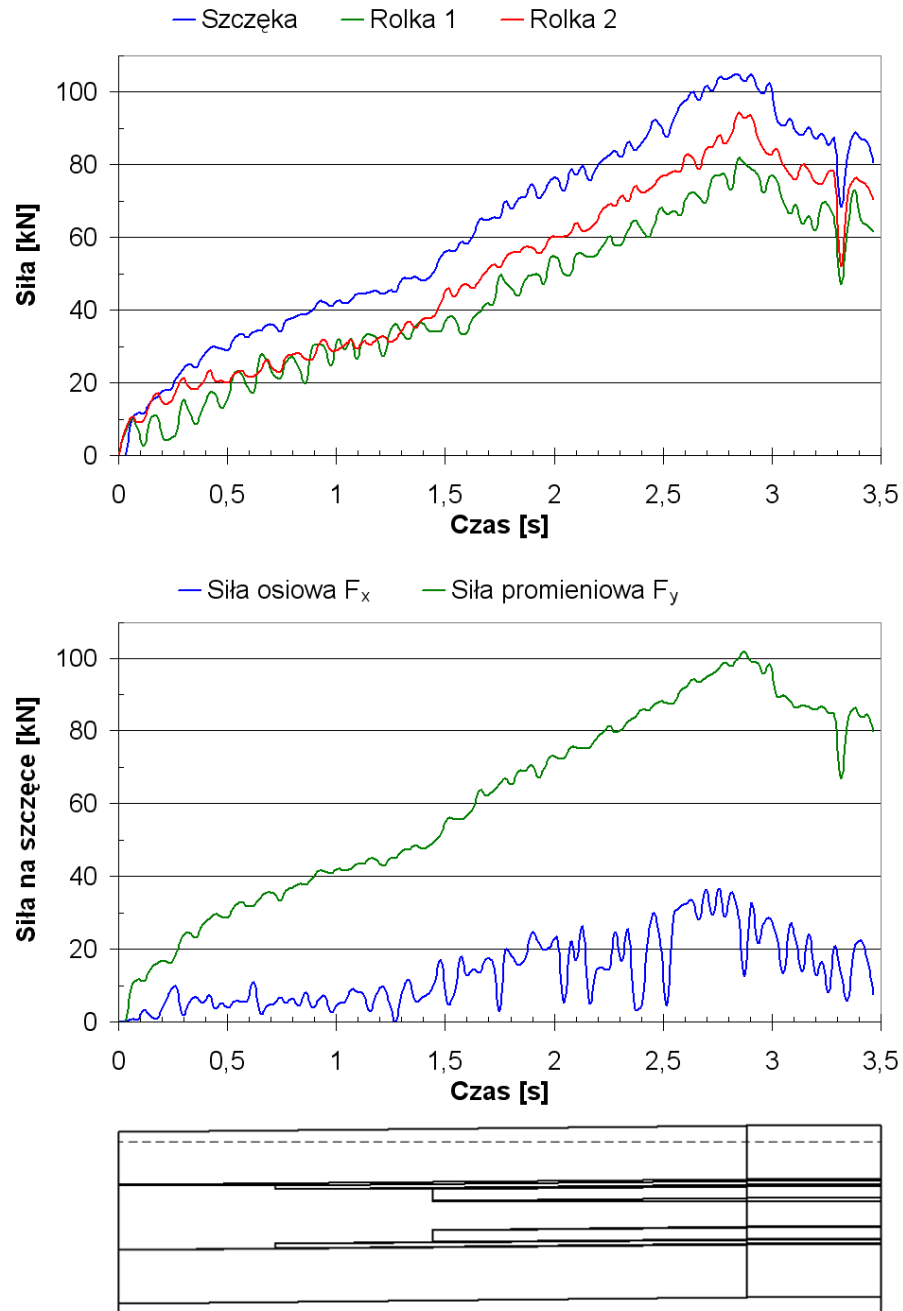
skrawaniem. Największy przyrost ścianki zlokalizowany jest w centralnej części stopnia o największej redukcji przekroju i wynosi ponad 40%.



Rys. 6.14. Zmiana grubości ścianki w odkuwce sworznia drążonego

W trakcie symulacji numerycznej tego procesu wyznaczono także rozkłady sił działających na narzędzia kształtujące oraz składowych F_x i F_y siły działającej na szczękę płaską, co zilustrowano na rys. 6.15. Poszczególne siły kształtowania mają podobny przebieg. Największą wartość siły odnotowano dla narzędzia płaskiego, a najmniejszą na rolce 1 (pod koniec fazy kształtowania). Siły w strefie kalibrowania podczas usuwania wad kształtu zmniejszają swą wartość.

W procesie obciskania składowa promieniowa siły jest około 3x większa od składowej stycznej. Taka proporcja składowych sił wynika z wielkości zastosowanego kąta wzniosu γ . Sprawia to, że największy udział w procesie ma składowa promieniowa siły, odpowiedzialna za redukcję średnicy przewężeń kształtowanych w odkuwce.



Rys. 6.15. Rozkłady sił występujących w procesie obciskania obrotowego sworznia drążonego

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono nową technologię kształtowania odkuwek drażzonych, którą nazwano obciskaniem obrotowym. Dokonano przeglądu literatury specjalistycznej, na podstawie którego scharakteryzowano główne technologie wytwarzania wyrobów tego typu.

W analizie teoretycznej procesu obciskania obrotowego wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Na potrzeby obliczeń wykonano schemat procesu obciskania obrotowego, z którego wyznaczono zależności określające ograniczenia geometryczne dla narzędzi kształtujących. Wykorzystując wyprowadzone zależności zbudowano modele MES uwzględniające różne parametry procesu kształtowania (kąt pochylenia powierzchni bocznej α , kąt wzniosu powierzchni kształtowania γ , stopień gniotu δ). Symulację numeryczną prowadzono w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. W modelowaniu procesu obciskania obrotowego uwzględniono dwa przypadki usytuowania stref poddanych kształtowaniu (w strefie centralnej odkuwki oraz na jej końcach). Przeprowadzone symulacje MES pozwoliły na wyznaczenie rozkładów intensywności odkształceń plastycznych, zmiany grubości ścianki i siły kształtowania.

Weryfikacji w warunkach laboratoryjnych dokonano w walcierce laboratoryjnej LUW – 2. Agregat ten wyposażono w parę rolek profilowych oraz trzy segmenty szczęk o kącie $\alpha = 30^\circ$, różniących się kątem wzniosu γ w zakresie $1^\circ 30' \div 3^\circ 30'$. Procesowi obciskania obrotowego poddawano próbki o wymiarach $\varnothing 25 \times 80$ mm różniące się grubością ścianki g_0 . Wsady przeznaczone do kształtowania wykonane były ze stali C45 (g_0 równe 2 mm, 3 mm i 4 mm) i R35 ($g_0 = 2,3$ mm, 3,6 mm i 5 mm) oraz stopów aluminium PA38 i tytanu Ti6Al4V ($g_0 = 3$ mm i 4 mm). Przeprowadzone próby laboratoryjne pozwoliły na analizę kształtu otrzymanych odkuwek (zmianę grubości ścianek) i określenie wielkości wad

kształtu (owalizacji), które porównano z wartościami wyznaczonymi teoretycznie. Badania doświadczalne potwierdziły przydatność stosowania symulacji numerycznej bazującej na MES do analizy procesu obciskania obrotowego. Jednak uzyskana dokładność obliczeń MES w dużej mierze uzależniona jest od użytkownika, do którego należy wykonanie modelu, przyjęcie warunków brzegowych i własności materiałowych.

Uzyskane rezultaty z obliczeń numerycznych i z badań doświadczalnych oraz ich analiza wykazały słuszność postawionej w pracy tezy.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych analizowanego procesu kształtowania sformułowano następujące wnioski:

- Uwzględniając geometrię szczęki oraz rolek jest możliwe prowadzenie procesu obciskania obrotowego (wg dwóch głównych schematów tj. w części centralnej wyrobu drażonego i na jego końcach), który może być realizowany narzędziami bez listew oporowych lub z listwami oporowymi – zgodnie z rys. 4.3 i 4.4.
- Listwy oporowe ograniczają osiowe płynięcie materiału, w wyniku czego umożliwiają otrzymanie wyrobu o większej grubości ścianki.
- Stabilność procesu obciskania obrotowego może być zakłócona niekontrolowanym poślizgiem (zgnieceniem) oraz deformacją wewnętrzną powierzchni swobodnej.
- W odkuwkach kształtowanych z wsadów o mniejszej g_0 występuje większy przyrost procentowy grubości ścianki.
- Odkształcenia w odkuwkach kształtowanych obciskaniem obrotowym mają rozkład warstwowy (pierścieniowy).
- Stosowanie mniejszych kątów wzniosu klina γ pozwala na otrzymanie wyrobów o większej dokładności.
- Metoda obciskania obrotowego umożliwia otrzymanie wyrobów ze wsadu o mniejszej grubości ścianki ($g_0 = 0,092d_0$), w porównaniu do wartości

dotychczas stosowanych w procesach walcowania poprzecznego ($g_0 = 0,2d_0$).

8. Literatura

- [1] Bartnicki J. Owalizacja wałków drążonych w procesach walcowania poprzeczno – klinowego , *Eksploatacja i Niezawodność* 2004 nr 2 (22) s. 5-8
- [2] Bartnicki J., Pater Z. The aspects of stability in cross - wedge rolling processes of hollowed shafts. *Journal of Materials Processing Technology* 2004 vol. 155-156 s. 1867-1873
- [3] Bartnicki J., Pater Z. The influence of tool geometry on the CWR process of hollowed shafts. *STEEL-GRIPS Journal of Steel and Related Materials* 2 (2004) Suppl. Metal Forming, s. 103-107
- [4] Bartnicki J., Pater Z.: *Walcowanie poprzeczno – klinowe wyrobów drążonych*, Wyd.: Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005
- [5] Belmont K. Commercial wedge rolling in the United States. W: *Proceedings of 2" International Conference on Rotary Metalworking Processes* October 6th - 8th 1982, Stratford upon Avon UK, s. 385-397
- [6] Celikov A. I. *Poperečno - klinovaja prokatka v mašinostreni*, Wyd.: Mašinostroenie, Moskva, 1982
- [7] Developments in rotary metalworking. *Machinery and Production Engineering* 2 February 1983, s. 34-35
- [8] Dobrzański L. A., *Leksykon materiałoznawstwa*, Wydawnictwo Verlag Dashofer, 2007
- [9] Dong Y., Lovell M., Tagavi K.: Analysis of slip in cross - wedge rolling: an experimentally verified finite - element model. *Journal of Materials Processing Technology* 1998 vol. 80-81, s. 273-281
- [10] Dong Y., Tagavi K., Lovell M., Deng Z.: Analysis of stress in cross - wedge rolling with application to failure, *International Journal of Mechanical Sciences* 42 (7) 2000, s. 1233 – 1253

- [11] Fang G., Lei L., Zeng P.: Three - dimensional rigid - plastic finite element simulation for the two - roll cross - wedge rolling process, *Journal of Material Processing Technology* 129 (1-3) 2002, s. 245 -249
- [12] Fu X. P., Dean T. A. Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process, *International Journal of Machinery Tools Manufacture Design, Research and Application* 1993 vol. 33, s. 367-400
- [13] GKN Car-Data Base 1995
- [14] Glaß R., Hahn F., Kolbe M., Meyer L. W. Process of partial bulk metal-forming - aspects of technology and FEM simulation, *journal of Materials Processing Technology* 1998 vol. 80-81 s. 174-178
- [15] Grigorev A. K. i in.: Izmenene tolščiny stenki pri poperečno-klinovoj prokatke polych zagotovok. *Izv. VUZ Černaja Metalurgija* 1975 nr 7, s. 99-102
- [16] Hayama M.: Optimum working conditions on cross rolling of stepped shaft - considering the formation of central cavity. *Sosei to Kako* 1976 nr 189, s. 797-804
- [17] Holub J.: *Příčné klínové válcování*. Wyd.: SNTL Praha 1972
- [18] Hu Z. H., Xiu X. H., Sa D. Y.: *The principles, processes and machines of helical rolling and cross wedge rolling*. Wyd.: Metali. Ind. Press, Beijing 1985
- [19] <http://falconmetals.rtrk.com>
- [20] <http://plast.pse.tut.ac.jp>
- [21] Kaporowich W.: *Proizvodstvo detalej iz trub obkatnoj*, Wyd.: Mašinostroenie, Moskva 1978
- [22] Klušín V. A., Makušok E. M., Ščukin V. Ja. Soveršenstvovanie poperečno - klinovoj prokatki, Wyd.: Nauka i Technika, Minsk 1980
- [23] Lange K: Modern metal forming technology for industrial production, *Journal of Material Processing Technology* nr 71, 1997, s. 2-13
- [24] Lazorkin V.: Technology for manufacturing hollow product of solid blanks by radial forging without piercing, Materiały reklamowe Technonova Co. Ltd. - <http://technonova.nm.ru>

- [25] Li Q., Lovell M., Slaughter W., Tagavi K: Investigation of the morphology of internal defects in cross - wedge rolling, *Journal of Material Processing Technology* 125 (1-3) 2002, s. 248 – 257
- [26] Li Q., Lovell M.: Predicting critical friction in two - roll cross -wedge rolling process, *Journal of Tribology - Transaction of the ASME* 125 (1) 2003, s. 200 – 203
- [27] Li Q., Lovell M.: The establishment of a failure criterion in cross wedge rolling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 24 (3-4) 08/2004, s. 180 – 189
- [28] Lovell M.: Evaluation of critical interracial friction in cross - wedge rolling, *Journal of Tribology - Transaction of the ASME* 123 (2) 2001, s. 424-429
- [29] Łuksza J.: *Elementy ciągarstwa*, Wyd. AGH, Kraków 2001
- [30] Magda J.: Poprzeczne walcowanie klinowe, *Obróbka Plastyczna* 1981 z. 4, s. 179-189
- [31] Magryta J.: Analiza numeryczna rozkładu grubości ścianek w wyrobach kształtowanych metodą obciskania obrotowego, Wybrane zagadnienia badawcze obróbki plastycznej i cieplnej metali oraz przetwórstwa tworzyw, Monografia pod red. T. Jachowicza, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2009 s. 51-58
- [32] Morphy G., Neelwarne A.: Weight reduction opportunities through innovative hydroforming Case of one piece frame rails & hollow camshafts, *National Conference on Sheet Metal Forming*, 12th – 13th December 2007, Hotel Le-Meridien, Pune, India
- [33] MSC.SuperForm 2005. User guide.
- [34] Neugebauer R., Kolbe M., Glaß R., Hoffmann M. Optimisation of processing routes for cross rolling and spin extrusion, *Journal of Materials Processing Technology* 2002 vol. 125- 26 s. 856-862
- [35] Oczos K. E., Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej część 1, *Mechanik* 8-9/2008 s. 639-656

- [36] Pater Z.: Stress state in cross - wedge rolling process, *Archives of Metallurgy* 48 (1) 2003, s. 21 – 35
- [37] Pater Z.: Three dimensional FEM simulation of wedge - rolls process, *Proceedings of the 8 International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Processes - Numiform 2004*, Ohio, 13-17.06.2004, s. 642-648
- [38] Pater Z. *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo-rolkowego*, Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 2007
- [39] Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009
- [40] Pater Z. *Walcowanie poprzeczno-klinowe odkuwek osiowo-symetrycznych*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001
- [41] Pater Z. Bartnicki J. Wedge-rolls rolling of hollowed parts, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2006 vol. 18, s. 407-410
- [42] Pater Z., Bartnicki J., Gontarz A., Weroński W.: Numerical Modeling of Cross - Wedge Rolling of Hollowed Shafts. *Proceedings of the 8 International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Processes - Numiform2004*, Ohio, 13-17.06.2004, s. 672-678
- [43] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Analiza możliwości zastosowania walcowania poprzeczno - klinowego do wytwarzania korpusów noży obrotowych. W: „*Badania teoretyczno-technologiczne procesów plastycznego kształtowania metali*” red. W. Weroński, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, s. 13 - 41
- [44] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls, *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006) 550–554
- [45] Pomankin W., Bobuch I., Gribinik W.: Pole Hnij skolženija pri prokatke s nerazriwnym polem skorostej, *Cernaja Metalurgija* nr 7, 1975

- [46] Sibakov W., Semendij W., Maklakov W.: Poperečno-klinovaja prokatka avtomobilnych detaliej s oblegčajusčimi polostiami, *Kuznečno - Stampovočnoe Proizvodstvo* 1986 nr 11, s. 11-13
- [47] Tsukamoto H. i in.: Cross roll method for the production of axi-symmetrical stepped shaft. *Proceedings of 2nd International Conference on Rotary Metalworking Processes* October 6th - 8ⁿ 1982, Stratford upon Avon UK, s. 936-941
- [48] Voelkner W.: Present and future development of metal forming: selected examples, *Journal of Materials Processing Technology* 2000 vol. 106, s. 236-242
- [49] Wang M., Li X., Du F., Zheng Y.: Hot deformation of austenite and prediction of microstructure evolution of cross - wedge rolling, *Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing* 379 (1-2) 2004, s. 133 - 140
- [50] Weroński W., Pater Z.: *Podstawy procesu walcowania poprzeczno-klinowego*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996
- [51] www.americanhydroformers.com
- [52] www.audi.de
- [53] www.audiworld.com
- [54] www.azom.com
- [55] www.bmw.de
- [56] www.china-hongfa.com
- [57] www.danahermotion.com
- [58] www.dmv-stainless.com
- [59] www.douglas-metals.com
- [60] www.engin.umd.umich.edu
- [61] www.eurocopter.de
- [62] www.forcast.ca
- [63] www.gm.com
- [64] www.gonar.com.pl

- [65] www.hmp.de
- [66] www.leifeldspinning.com
- [67] www.smst-tubes.com
- [68] www.snecma.com
- [69] www.thefabricator.com
- [70] www.vmtubes.de
- [71] www.volkswagen.de