



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Opracowanie technologii produkcji puszki napojowej z nowym
kształtem kołnierza wykonanej ze stopu aluminium serii 3xxx
z wykorzystaniem modelu MES**

Autor: mgr inż. Przemysław Wędrychowicz

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrij Milenin

Promotor pomocniczy: dr Dawid Wodka

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Kraków, 2023

Podziękowania

Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do mojego promotora prof. dr hab. inż. Andrija Milenina oraz promotora pomocniczego dr Dawida Wodki, za merytoryczne wsparcie oraz nieustającą motywację podczas prowadzonych prac badawczych. Jestem wdzięczny za naukową opiekę, wyrozumiałość, cenne wskazówki i czas poświęcony na dyskusje.

Pracę dedykuję Córkom i Żonie.

Spis treści

1	Rola formowania metali w procesie produkcji puszek napojowych	5
2	Materiał do produkcji puszek napojowych	7
2.1	Proces produkcji aluminium	7
2.2	Stop aluminium 3104 H19	11
3	Aluminiowa puszka napojowa	13
3.1	Architektura dwuczęściowej puszki napojowej	14
4	Formowanie aluminiowej puszki napojowej	17
4.1	Głębokie tłoczenie	21
4.1.1	Wpływ umocnienia materiału	24
4.1.2	Wpływ tarcia	25
4.1.3	Wysokość wytłoczki	26
4.1.4	Powstawanie defektu typu „ucha”	27
4.2	Przetłaczanie	28
4.3	Wyciąganie ścianki	30
4.4	Zawężanie	34
5	Etapy przygotowawcze w procesie produkcyjnym puszki	35
5.1	Mycie puszki	35
5.2	Proces suszenia w piecu pinowym	37
5.3	Proces suszenia w piecu IBO	38
6	Analiza stanu problemu, cel i teza pracy	39
7	Opracowanie krzywej umocnienia materiału	43
7.1	Opracowanie modelu sprężysto-plastycznego stopu 3104 H19	45
7.2	Opracowanie zminiaturyzowanych próbek do testów jednoosiowego rozciągania	47
7.3	Kalibracja krzywej umocnienia	47
7.4	Wyniki badań eksperymentalnych	48
8	Wpływ temperatury w procesie produkcyjnym puszki	55
8.1	Testy materiału z poboczniczy puszki	57
8.2	Testy jakościowe puszki	60
8.3	Badanie własności lakieru wewnętrznego	62
8.4	Symulacje testów jakościowych puszki	63
9	Symulacje procesu formowania aluminiowej puszki napojowej	67

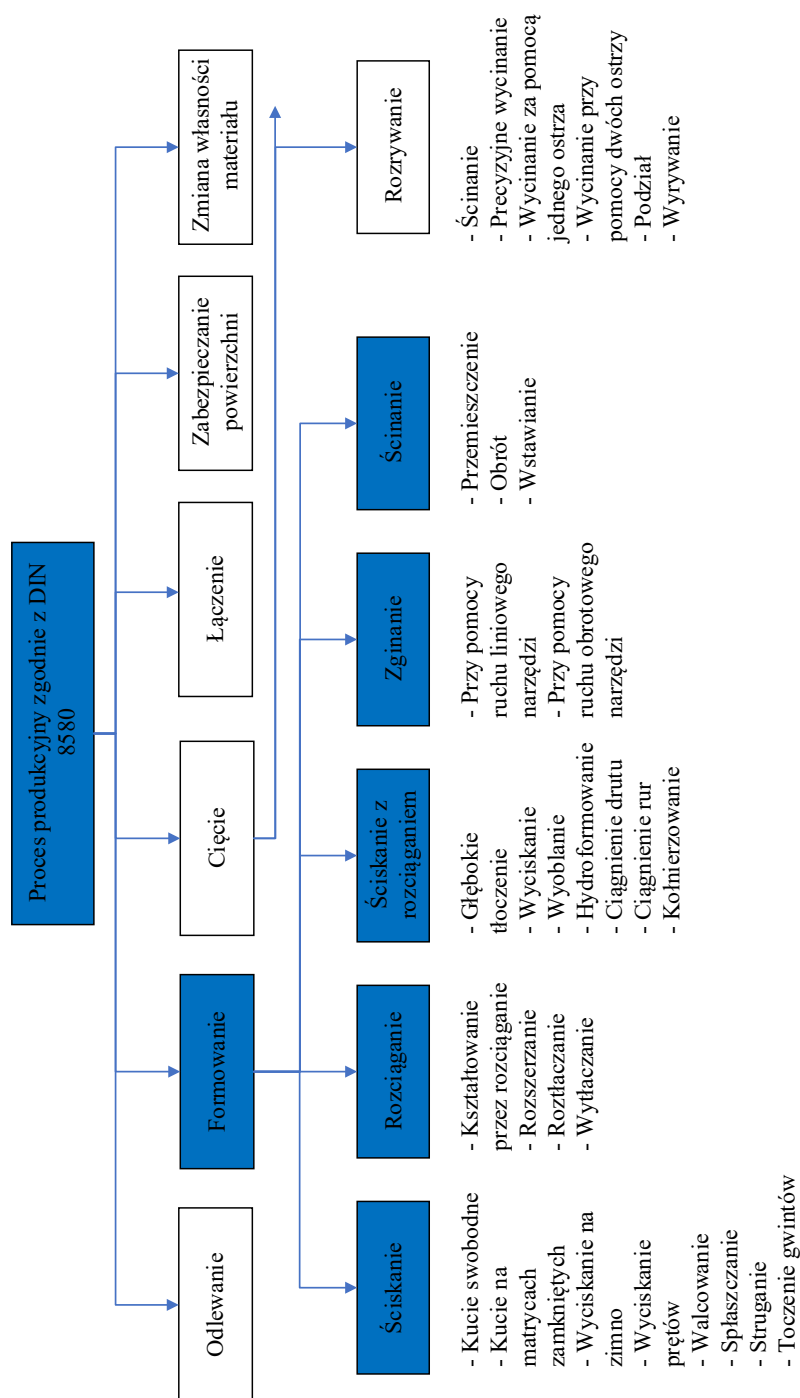
9.1	Prasa pionowa oraz prasa pozioma	70
9.2	Symulacje procesu zawężania	73
10	Efekty przeprowadzonych prac	77
10.1	Nowy stempel tłoczący	77
10.2	Warunki przeprowadzania eksperymentu	82
10.3	Porównanie wyników symulacji nowego oraz standardowego stempla.....	83
11	Podsumowanie i wnioski.....	84
	Bibliografia	87

1 Rola formowania metali w procesie produkcji puszek napojowych

Proces plastycznej przeróbki metali towarzyszy ludzkości od wielu lat. Dowodem na to są odkrycia archeologiczne pochodzące sprzed 5300 lat [1]. W celu ułatwienia ręcznego formowania metali zaczęły również powstawać narzędzia przydatne podczas tego procesu. W kolejnych latach rozwoju, powstawały pierwsze maszyny wykorzystywane do celów formowania metali, na przykład wytlaczania monet. W średniowieczu w Niemczech oraz Szwecji zaczęto wykorzystywać proces podobny do głębokiego tłoczenia, a w 1850 roku ulepszono ten proces poprzez zastosowanie dociskacza. Jednym z największych przełomów było wynalezienie procesu walcowania metalu, co umożliwiło zwiększenie wydajności produkcji blach metalowych oraz pozwoliło na precyzyjniejszą kontrolę ich grubości. Proces walcowania wykorzystywany jest do dzisiaj i stanowi jeden z podstawowych etapów przygotowania blachy aluminiowej wykorzystywanej do produkcji aluminiowej puszki napojowej.

Historia opakowań do przechowywania żywności zapoczątkowana została przez Napoleona, który wyznaczył nagrodę za opracowanie metody długoterminowego przechowywania żywności dla jego armii. Nagrodę otrzymał w 1810 roku francuski wynalazca Nicolas Appert, twórca współczesnych metod konserwacji żywności, między innymi apertyzacji [2]. W tym samym roku Peter Durand, brytyjski wynalazca otrzymał patent na metodę przechowywania żywności w puszkach. W 1812 roku powstała pierwsza fabryka produkująca puszki, a w 1935 roku po raz pierwszy firma Kruger zapakowała swoje piwo do tego opakowania. W tamtym czasie były to tzw. puszki trzyczęściowe, składające się z dwóch wieczek oraz korpusu [3], a do ich otwarcia potrzebny był specjalny „klucz”. Od tamtego czasu rozpoczął się intensywny rozwój tego typu opakowań, w trakcie którego powstawały różne sposoby pozwalające na otwarcie puszki. Proces lutowania korpusu został zastąpiony zgrzewaniem, a w późniejszym czasie powstała technologia umożliwiająca produkcję puszki dwuczęściowej, składającej się z korpusu i denka jako całości oraz górnego wieczka. W trakcie rozwoju technologii produkcji, oprócz obecnie stosowanego procesu głębokiego tłoczenia, opracowano także metodę wyciągania ścianki poprzez jej pocienianie. Głębokie tłoczenie oraz pocienianie ścianki stanowią dwa podstawowe etapy formowania produkowanych dzisiaj puszek napojowych [4]. O istotnym znaczeniu procesu przeróbki plastycznej metali w technologii produkcji puszek napojowych może stanowić fakt, że wielu

naukowców od lat bada oraz stara się znaleźć zależności pomiędzy zdolnością materiału do plastycznego formowania, a: składem chemicznym, strukturą krystaliczną, stanem naprężenia w odkształcanym materiale, wytrzymałością, przewodnością elektryczną, odpornością na korozję czy chropowatością [5]. Procesy głębokiego tłoczenia oraz pocieniania ścianki stanowią tylko dwie z wielu metod formowania metali, oznaczonych kolorem niebieskim na schemacie podziału procesów wytwarzania zgodnie z normą DIN 8580 (Rys. 1.1).



Rys. 1.1 Podział procesów produkcyjnych zgodnie z normą DIN 8580

2 Materiał do produkcji puszek napojowych

Podstawowym materiałem wykorzystywanym dzisiaj do produkcji zarówno korpusu puszki oraz jej wieczka są stopy aluminium [6]. Jedną z istotnych zalet wieczek wykonanych ze stopu aluminium w porównaniu do wieczek ze stali jest łatwość otwierania. Jednocześnie, grubość pozostałości nacięcia, czyli obszaru pozostawionego po nacięciu metalu w miejscu, gdzie na wieczku formowana jest linia nacięcia, jest większa w przypadku aluminium niż w przypadku stali. Dla stali tolerancja między odpowiednią głębokością nacięcia, a siłą wymaganą do otwarcia wieczka jest znacznie mniejsza, co może prowadzić do zwiększonych problemów produkcyjnych.

W przypadku materiału używanego do produkcji korpusu puszki, zazwyczaj stosuje się stop aluminium, a znacznie rzadziej stal. Puszka wykonana ze stali jest ponad dwukrotnie cięższa od puszki aluminiowej. Co więcej, puszka aluminiowa po procesie mycia charakteryzuje się wyjątkowym połyskiem, co ma duże znaczenie ze względu na zadruk litografii na jej zewnętrznej powierzchni. To właśnie z tych powodów puszki aluminiowe cieszą się wysoką popularnością wśród producentów napojów, dlatego nowo powstałe fabryki produkujące puszki napojowe projektuje się z myślą o wykorzystaniu stopu aluminium.

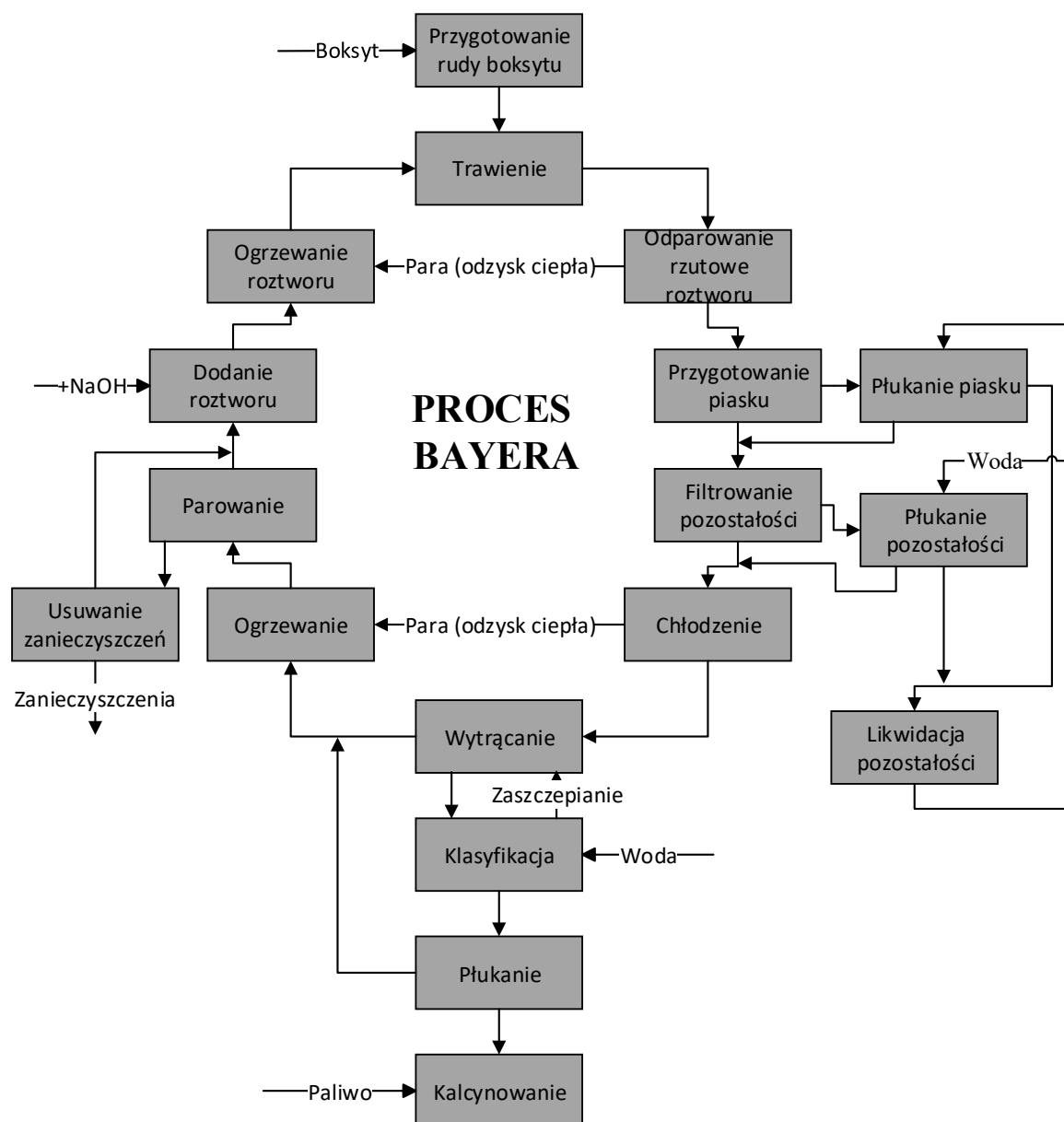
2.1 Proces produkcji aluminium

Aluminium, w polskiej nomenklaturze naukowej i technicznej określane jako glin, jest lekkim, trwałym metalem, który cechuje się wysoką plastycznością oraz bardzo dobrym stosunkiem wytrzymałości do masy. Dlatego też, jest jednym z najczęściej wykorzystywanych metali na świecie. Stopy na bazie aluminium znajdują zastosowanie w budownictwie, produkcji motoryzacyjnej, wytwarzaniu urządzeń AGD oraz dóbr konsumpcyjnych nietrwałego użytku takich jak puszka napojowa [7]. Aluminium to srebrzystobiały metal o liczbie atomowej 13 i względnej masie atomowej 26,98. Krystaliczna struktura czystego aluminium to sieć regularna, ściennie centrowana typu A1 o parametrze 0,40408 nm. Z gęstością 2,7 g/cm³ należy do najlżejszych metali, które są stabilne w warunkach atmosferycznych, co wynika z faktu tworzenia się cienkiej warstwy tlenku, chroniącej metal przed dalszym utlenianiem. Aluminium topi się w temperaturze 660 °C i wrze w temperaturze 2467 °C.

Związki aluminium występują we wszystkich rodzajach gliny, ale jedną z rud zawierającą ich najwięcej jest ruda boksytu, która pozyskiwana jest na największą skalę w Australii oraz

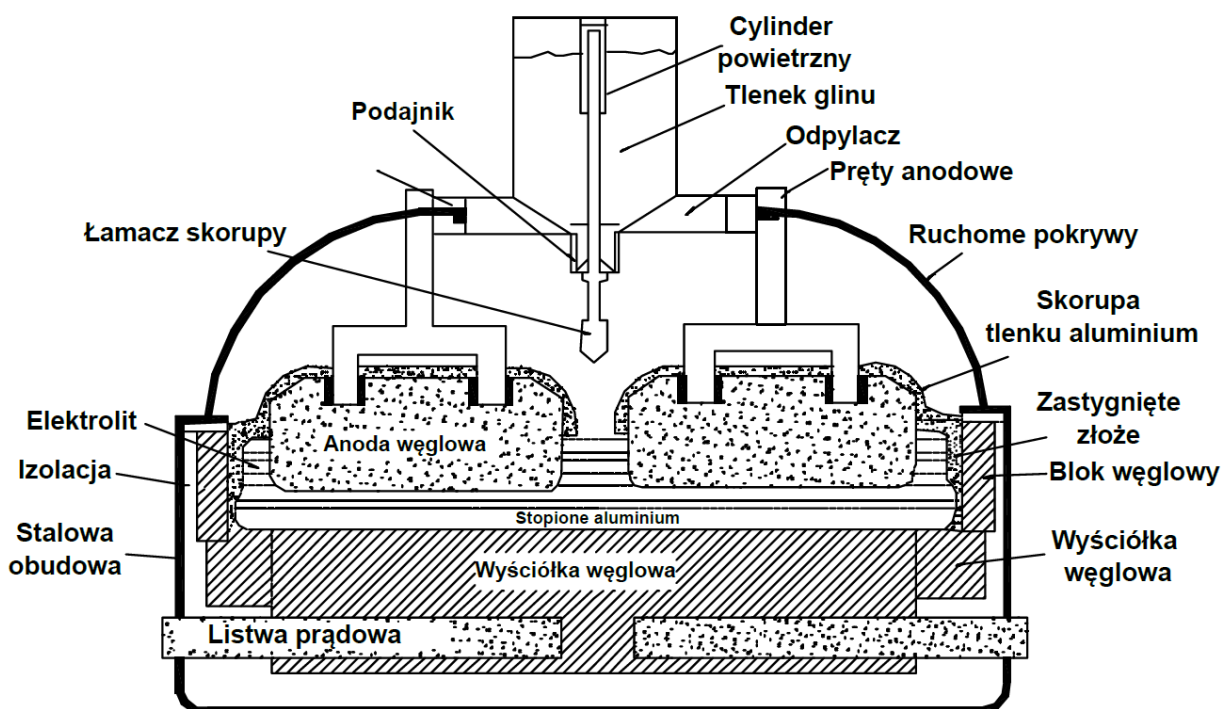
Chinach [7]. Boksyt zawiera około 45-60 % tlenku aluminium, pozostała część to między innymi piasek, żelazo oraz inne metale.

Produkcja pierwotnego aluminium odbywa się w dwóch procesach, pierwszym z nich jest procesie Bayera (Rys. 2.1), w którym następuje oczyszczenie rudy boksytowej i uzyskanie tlenku glinu. W procesie Bayera czyli procesie produkcji tlenku aluminium możemy wyróżnić trzy etapy: ekstrakcję, wytrącanie i kalcynację. Na początku procesu do rudy boksytu dodawany jest tlenek wapnia, następnie jest ona przetwarzana w młynach rurowych aż do osiągnięcia frakcji o średnicy mniejszej niż 315 mikrometrów. Do zmielonej rudy boksytu dodawany jest roztwór NaOH, w kolejnym kroku cała zawiesina pompowana jest do autoklawu gdzie podgrzewana jest do temperatury 110-270 °C i poddana działaniu ciśnienia wynoszącego 340 kPa. Warunki te utrzymywane są przez okres od pół godziny do kilku godzin. Podczas tego etapu zachodzą zjawiska rozpuszczania tlenku glinu uwięzionego w boksycie oraz powstawania osadów stałych, które zwane są „czerwonym szlamem”. Gorąca zawiesina przechodzi przez serię zbiorników, w których obniżane jest ciśnienie oraz odzyskiwane ciepło. Schłodzony roztwór trafia do zbiornika sedymentacyjnego. Podczas przebywania w tym zbiorniku, zanieczyszczenia, które nie rozpuszczają się w ługu sodowym, osadzają się na dnie. Po opadnięciu zanieczyszczeń, pozostała ciecz wyglądem przypominająca kawę, pompowana jest przez zestaw filtrów z tkanin, których celem jest usunięcie drobnych zanieczyszczeń z roztworu. Przefiltrowana ciecz jest później pompowana przez serię zbiorników sedymentacyjnych, do których dodatkowo dodawany jest hydrat glinu stanowiący zarodki krystalizacji. Krystalizujące kryształy $\text{Al}(\text{OH})_3$ opadają na dno zbiorników sedymentacyjnych, a w kolejnym kroku są z nich usuwane. Powstałe kryształy są następnie przemywane wodą i po etapie mycia przenoszone są do pieca do kalcynacji. Przenośnik ślimakowy przesuwa strumień kryształów do obracającego się, pochylonego pieca cylindrycznego. Temperatura 1000-1250 °C powoduje odparowanie cząsteczek wody, pozostawiając bezwodne kryształy czystego tlenku aluminium [8].



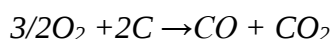
Rys. 2.1 Schemat procesu Bayera [8]

Następującym po procesie Bayera jest etap wytopu aluminium w elektrolitycznym procesie Halla-Héroulta (Rys. 2.2). W procesie Halla-Héroulta tlenek glinu Al_2O_3 jest rozpuszczany w kąpieli stopionego kriolitu Na_3AlF_6 . Dzięki obecnemu w roztworze fluorkowi glinu AlF_3 , który zmniejsza temperaturę topnienia kriolitu, średnia temperatura topnienia roztworu wynosi 960°C . Mieszanina poddana jest procesowi elektrolizy, zachodzi ona w zbiorniku z izolacją cieplną i pochylonym dnem. Zbiornik w swojej dolnej części posiada wyjście za pomocą którego pobierane jest stopione aluminium.



Rys. 2.2 Schemat ogniwa elektrolitycznego procesu Hall-Héroulta [9]

W ogniwie elektrolitycznym, przepływ prądu powoduje wydzielanie się jonów glinu na katodzie (2.1) i w rezultacie przy temperaturze elektrolitu wynoszącej 960 °C zaczyna się topić i osadzać na dnie zbiornika. Anoda (2.2) węglowa ulega utlenieniu a wydzielający się tlen reaguje z grafitem tworząc mieszaninę CO oraz CO₂. Dzięki temu procesowi uzyskiwany jest metal o czystości wynoszącej 99,95 %.



Ciekłe aluminium jest na bieżąco usuwane z układu elektrolitycznego, a następnie transportowane w tyglach do hali odlewniczej huty. Na tym etapie metal zawiera jeszcze niewielkie ilości żelaza, krzemu, miedzi i innych pierwiastków. Jednak nawet niewielkie ilości domieszek mogą mieć istotny wpływ na własności aluminium, dlatego wszystkie domieszki są usuwane przez przetopienie aluminium w specjalnym piecu osiągniętym temperaturę 800 °C. Po tym etapie, w hali odlewni nie tylko nadaje się aluminium odpowiedni kształt ale także odpowiedni skład chemiczny, ponieważ czyste aluminium jest wykorzystywane o wiele rzadziej niż jego stopy. Stopy aluminium są tworzone poprzez mieszanie czystego aluminium z innymi metalami czyli tak zwanymi dodatkami stopowymi.

Niektóre dodatki stopowe zwiększają wytrzymałość, inne zwiększają gęstość, jeszcze inne zmieniają jego zdolność do przewodzenia ciepła itp. [10]. Wśród powszechnie stosowanych pierwiastków stopowych znajdują się bor, żelazo, krzem, magnez, mangan, miedź, nikiel, ołów, tytan, chrom, cynk, cyrkon, lit, skand, srebro. Ponadto, stopy aluminium mogą zawierać dziesiątki innych pierwiastków stopowych, takich jak stront, fosfor i inne. Pozwala to osiągnąć ogromną różnorodność oraz kombinacje pożądanych własności, dlatego też w przemyśle obecnie stosuje się powszechnie ponad 100 różnych stopów aluminium. Co jest warte podkreślenia, z ekonomicznego punktu widzenia, produkcja pierwotnego aluminium z rudy boksytu pochłania około 13 kWh/kg energii, podczas gdy recykling aluminium wymaga jedynie 2,8 kWh/kg, czyli 5% energii zużywanej przy produkcji pierwotnego aluminium [11].

2.2 Stop aluminium 3104 H19

Stopy Al z Mg do obróbki plastycznej, zwane zwyczajowo hydronaliami, zawierają różną ilość magnezu, zazwyczaj w zakresie od 0,44% do 5,6%. Do stopu mogą być wprowadzane dodatkowo niewielkie ilości Mn, Si, Cr, Fe lub Pb. Stopy te posiadają podwyższone własności mechaniczne, są odporne na korozję w środowisku wody i atmosferze morskiej, a także charakteryzują się dobrą spawalnością oraz podatnością na głębokie tłoczenie. Hydronalia posiadają dwufazową strukturę, stałego roztworu α i wydzieleni fazy β . Dzięki umocnieniu odkształceniowemu możliwe jest zwiększenie własności wytrzymałościowych tych stopów [12]. W celu uzyskania pożądanych własności poddaje się je również procesom wyżarzania ujednorodniającego, rekrytalizującego, odprężającego oraz utwardzania wydzieleniowego. Można także zastosować do nich obróbkę cieplno-mechaniczną zarówno w niskich, jak i wysokich temperaturach. Stopy Al z dodatkiem Mg znajdują zastosowanie w przemyśle okrętowym i lotniczym do produkcji średnio obciążonych elementów. Są również wykorzystywane w urządzeniach przemysłu spożywczego i chemicznego, jak również do produkcji opakowań spożywczych takich jak puszki napojowe.

Ze względu na swoje fizyczne i chemiczne własności, stop aluminium 3104 w stanie umocnienia H19 jest najczęściej wykorzystywany do produkcji aluminiowej puszki napojowej. Pożądanymi w tym przypadku cechami stopu 3104 jest niska gęstość oraz odporność na korozję [13]. Stop aluminium 3104 zapewnia wysoką wytrzymałość wytworzonych z niego puszek i jednocześnie charakteryzuje się dobrą tłocznością [14]. Głównymi dodatkami stopowymi w stopie aluminium 3104 jest Mn, który zwiększa jego

wytrzymałość mechaniczną oraz Mg, który zwiększa podatność materiału na umocnienie odkształceniowe i jednocześnie nie wpływa negatywnie na odporność korozyjną [15]. Dla zwiększenia wytrzymałość blach ze stopu 3104, poddawane one są walcowaniu na zimno do stanu umocnienia H19. Proces walcowania taśmy aluminiowej zwiększa jego wytrzymałość mechaniczną poprzez wzrost gęstości dyslokacji oraz zmianę tekstury krystalograficznej [16]. Pozostałymi istotnymi cechami materiału wykorzystywanego w produkcji puszek napojowych są: niska tendencja do tworzenia na wyłoczkach defektów typu „ucha” [17], brak tendencji do osadzania się na narzędziach tłoczących, równomierna grubość taśmy, płaskość taśmy, a wszystko to aby współgrać z wysoką precyzją narzędzi tłoczących puszkę napojową [13].

W Tabeli 2.2 znajdują się wyniki analizy składu pierwiastkowego blachy ze stopu 3104 H19 wykonanej przez jednego z dostawców do celów produkcji aluminiowej puszki napojowej. Parametry mechaniczne stopu 3104 w stanie umocnienia H19, wykorzystywanego do produkcji aluminiowej puszki napojowej zostały zbadane w próbie jednoosiowego rozciągania przy wykorzystaniu ustandaryzowanych próbek o kształcie wiośłkowym, a wyniki zostały przedstawione w Tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Uśrednione wyniki próby jednoosiowego rozciągania stopu aluminium 3104 H19 wykorzystywanego do produkcji aluminiowej puszki napojowej

Stop	a0(mm)	b0(mm)	S0(mm2)	Rp0,2(MPa)	Rm(MPa)	A(%)
3104 H19	0,24	12,50	3,00	286,74 ± 1,53	315,31 ± 1,22	4,92 ± 0,39

Gdzie: *a0* – grubość początkowa próbki, *b0* – szerokość początkowa próbki, *S0* – początkowe, poprzeczne pole powierzchni próbki

Tabela 2.2 Wyniki przeprowadzonej analizy składu pierwiastkowego stopu aluminium 3104 H19 wykorzystywanego do produkcji aluminiowej puszki napojowej

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ga	V	Ti	Inne Suma	Al
0,176 ± 0,009	0,431 ± 0,003	0,129 ± 0,001	0,833 ± 0,005	1,191 ± 0,020	0,032 ± 0,001	0,009 ± 0,001	0,031 ± 0,002	0,015 ± 0,002	0,071 ± 0,002	97,082 ± 0,162

3 Aluminiowa puszka napojowa

Aluminiowa puszka napojowa jest bezpośrednim potomkiem puszek stalowej. Pierwsze tego typu pojemniki pojawiły się w 1935 roku, zostały wprowadzone na rynek przez firmę Kreuger Brewing Company w Richmond, w stanie Wirginia w USA [18]. Podobnie jak puszki na żywność, pierwsze puszki napojowe były wykonane ze stali i składały się z trzech części: korpusu oraz dwóch wieczek, dlatego zwane były puszkami trzyczęściowymi [3]. W tamtych czasach niektóre puszki stalowe miały nawet stożkowe wieczka, które były zamykane zamknięciami koronowymi tzw. kapslami. Podczas II wojny światowej rząd Stanów Zjednoczonych Ameryki wysyłał duże ilości piwa w puszkach stalowych do żołnierzy stacjonujących za granicą. Po wojnie jednak większość produktów znowu zaczęto sprzedawać w szklanych butelkach. Ponieważ weterani zachowali sympatię do piwa w puszkach, producenci nie porzucili całkowicie tej technologii pakowania, pomimo że trzyczęściowa puszka napojowa była droższa w produkcji niż butelka.

Pierwsza aluminiowa puszka do napojów trafiła na rynek w 1958 roku. Została opracowana przez firmę Adolph Coorps Company z Golde w Kolorado USA, a zaprezentowana klientom przez browar Primo. Wykonana była z dwóch aluminiowych części, stąd nazwa dwuczęściowa puszka napojowa. Do produkcji takich puszek firma Coors wykorzystywała proces wyciskania uderzeniowego. Metoda ta polega na wyciskaniu okrągłej pastylki aluminium o średnicy finalnej puszek. Stempel naciskający na aluminium powoduje wsteczny przepływ materiału wokół niego, formując korpus oraz denko puszek. Produkowane niezależnie wieczko było łączone z puszką po napełnieniu jej napojem. Ta wczesna technologia okazała się jednak nieodpowiednia do masowej produkcji, była wolna, a problemy z narzędziami znacznie utrudniały proces. Dodatkowo puszki wykonane w tej technologii nie miały optymalnej budowy pod względem konstrukcyjnym. Podstawa puszek nie mogła być cieńsza niż 0,765 mm co było znacznie powyżej wymagań wytrzymałościowych, wynikających z panującego wewnątrz puszek ciśnienia.

Duża popularność puszek na rynku napojów, zachęciła firmę Coors i inne przedsiębiorstwa do poszukiwania lepszego sposobu jej wytwarzania. Kilka lat później Reynolds Metals zapoczątkował współczesną metodę produkcji. Proces zapoczątkowany przez firmę Reynolds z języka angielskiego opisywany jest akronimem DWI (Draw and Wall Ironing) czyli proces tłoczenia oraz wyciągania ścianki poprzez pocienianie jej grubości [10]. Coors wraz z firmą Aluminium & Chemical Corporation szybko dołączyły do tego trendu, jednak naciski ze

strony dużych firm produkujących puszki, które kupowały również stal od przedsiębiorstwa Kaiser do trzyczęściowych puszek, rzekomo zmusiły firmę do tymczasowego wycofania się z rozwoju puszek aluminiowych. Najprawdopodobniej, producenci puszek stalowych obawiali się konkurencji ze strony nowej generacji pojemników na napoje. W 1964 roku browar Hamms w St. Paul w Minnesocie zaczął sprzedawać piwo w aluminiowych puszkach napojowych, a dwa lata później firmy Coca-Cola oraz PepsiCo zaczęły również korzystać z tego rodzaju opakowań. Obecnie, większość puszek na napoje produkowana jest z aluminium. Produkcja trzyczęściowej puszki stalowej osiągnęła swój szczyt w roku 1973, natomiast szczyt produkcji dwuczęściowej puszki stalowej przypadała na lata 70. Obecnie ten rodzaj puszki stanowi mniej niż 1 procent wszystkich puszek na rynku, są one przeważnie używane do napojów o wyjątkowo długim terminie ważności.

Mimo złożoności procesu produkcyjnego i skomplikowanej budowy, produkcja aluminiowych puszek do napojów stale rośnie na całym świecie, zwiększając się o kilka miliardów puszek rocznie. Jednym z kluczowych czynników wpływających na sprzedaż napojów w aluminiowych puszkach, jest możliwość poddania tych opakowań recyklingowi. Pomimo że korpus puszki produkowany jest ze stopu aluminium 3104, w wieczko ze stopu 5182 charakteryzującego się innymi właściwościami [19], materiał puszek aluminiowych niemal w 100% nadaje się do powtórnego użycia. Dlatego też puszki aluminiowe są jednym z opakowań najczęściej poddawanych recyklingowi [20].

Dużą popularność w branży opakowań, aluminiowe puszki zawdzięczają również swoim innym wyjątkowym cechom:

- Puszki aluminiowe blokują dostęp światła i powietrza do napoju, co pomaga przedłużyć okres przydatności do spożycia napoju i zachować jego smak. Inne materiały opakowaniowe, takie jak plastik, nie są nieprzezroczyste ani tak szczelne.
- Pojemniki wykonane z aluminium są efektywne w produkcji, transporcie, przechowywaniu i ekspozycji, ponieważ są lekkie i możliwe jest ich ułożenie w stosach.
- Puszki aluminiowe mogą wytrzymać ciśnienie wymagane do pakowania napojów gazowanych. Mogą również wytrzymać uderzenia i opierać się pęknięciom podczas transportu, w przeciwieństwie do kruchych szklanych butelek.

- Konsumenci mogą łatwo i bezpiecznie transportować napoje w puszkach aluminiowych, aby cieszyć się nimi w podróży.
- Aluminium, charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję.
- Puszki aluminiowe szybko się schładzają w porównaniu do innych opakowań na napoje.
- Recykling aluminium jest bardziej opłacalny niż produkcja pierwotnego aluminium, jednocześnie zmniejsza wpływ na środowisko. Puszki aluminiowe mogą być w pełni poddane recyklingowi [21] i używane ponownie w nieskończoność w procesie "obiegu zamkniętego" [22], co oznacza, że nie trafią na wysypisko śmieci. Zawartość materiałów pochodzących z recyklingu, w produkowanych dzisiaj puszkach sięga nawet 70%, co stanowi ponad trzykrotnie większy odsetek niż w przypadku plastikowych lub szklanych butelek.
- Puszki aluminiowe są idealne dla producentów napojów, ponieważ są łatwe do zadrukowania i zapewniają doskonałą bazę do prezentacji kolorów i grafiki. Aluminium jest również naturalnie błyszczącym, przyciągającym wzrok materiałem, co pomaga puszkom wyróżniać się na półkach sklepowych. Wiele marek poszukuje materiałów, które łatwo można dostosować do swoich potrzeb, co sprawia, że puszka aluminiowa staje się jeszcze bardziej atrakcyjna na rynku napojów.

3.1 Budowa dwuczęściowej puszki napojowej

Budowa dwuczęściowej puszki napojowej przedstawiona na Rys. 3.1 obrazuje złożony charakter puszki napojowej, który jest wynikiem wieloletniej pracy inżynierów i naukowców. Produkowane obecnie aluminiowe puszki napojowe nadal są przedmiotem ciągłych badań i rozwoju [4]. Opakowanie to charakteryzuje się skomplikowanym procesem produkcji, który rozpoczyna się już w hucie aluminium gdzie wytwarzany jest do ich produkcji odpowiedni stop. Kompletna aluminiowa puszka napojowa składa się z dwóch niezależnie produkowanych elementów: korpusu wykonanego ze stopu aluminium 3104 oraz wieczka z kluczykiem ze stopu 5182. Można wyznaczyć trzy charakterystyczne obszary aluminiowej puszki napojowej, są nimi: denko, pobocznica oraz górna część. Denko puszki stanowi nawet 25% masy całego opakowania. Grubość materiału w tym obszarze jest prawie taka sama jak grubość materiału wsadowego. Celowo zaprojektowany kształt denka ma zapewnić możliwość układania puszki w stosy oraz przeciwdziałać ciśnieniu panującemu wewnątrz

puszki. Drugim charakterystycznym obszarem puszki jest jej pobocznica. Pobocznica puszki jest obszarem o stałej grubości ścianki wynoszącej około 90 μm , jest to obszar, który determinuje wytrzymałość puszki podczas jej osiowego obciążania. Trzecim charakterystycznym obszarem puszki, jest jej górna część składająca się z uformowanej szyjki i kołnierza. Zawężenie górnej części puszki zostało wprowadzone w celu zastosowania wieczka o mniejszej średnicy. Górny fragment puszki, jeszcze przed etapem zawężania nazywany jest ścianką grubą, ponieważ jej grubość jest większa niż grubość pobocznicy puszki i wynosi około 150 μm . Pozostałe istotne elementy puszki to jej wieczko, наносzona podczas etapu produkcyjnego warstwa lakieru wewnętrznego oraz zewnętrzna litografia.



Rys. 3.1 Budowa aluminiowej puszki napojowej [18]

4 Formowanie aluminiowej puszki napojowej

Miliony aluminiowych puszek i wieczek do napojów są produkowane codziennie na całym świecie. Przekłada się to na setki ton przetworzonego materiału wsadowego. Nawet nieznaczne zmniejszenie ilości aluminium zużytego do wyprodukowania jednej puszki, zredukowanie odpadów, bądź usprawnienie produkcji prowadzi do realnych oszczędności, mogących sięgać w skali roku milionów lub dziesiątek milionów złotych. Kluczowe jest więc dogłębne poznanie procesu technologicznego aby móc wprowadzać w nim kolejne korzystne modyfikacje.

Kręgi aluminiowej blachy ze stopu aluminium 3104 H19, które trafiają do zakładów produkcyjnych, zostają przekształcone w aluminiowe puszki napojowe poprzez serię operacji formowania (Rys. 4.4) oraz innych etapów pośrednich. W ciągu produkcyjnym, wytłoczki i puszki aluminiowe przemieszcza się z prędkością około 1800-3000 puszek na minutę, poddawane są obróbce i formowaniu w około 20 maszynach, do etapu w którym gotowa puszka zostaje umieszczona na palecie transportowej. Cały proces produkcyjny od blachy aluminiowej do gotowej puszki trwa około 45 minut.

Blacha z aluminiowych kręgów wprowadzana jest na linię produkcyjną za pomocą rozwijarki, następnie przemieszcza się do smarownicy i pionowej prasy formującej (Rys. 4.1). W prasie pionowej podczas jednego skoku narzędzi wykonywane są dwie operacje: wykrawanie formatki i pierwsze tłoczenie. Operacja wykrawania polega na utworzeniu formatki, która zawiera objętość metalu niezbędną do wyprodukowania puszki. Formatka, kształtem zbliżona do koła, jest oddzielana od reszty arkusza blachy za pomocą trzech narzędzi (matrycy do wykrawania i tłoczenia - docisku - górnego ostrza tnącego). Operacja tłoczenia odbywa się od razu po wycięciu gdy materiał nadal jest uchwycony między dwoma narzędziami (matrycą do wykrawania i tłoczenia - dociskiem), a dzięki przesuwającemu się stemplowi powstaje wytłoczka. Te dwa procesy zachodzą w jednym ruchu prasy, a rezultatem jest aluminiowa wytłoczka zwana kubkiem posiadająca na tym etapie średnicę większej niż średnica puszki. Istotne aspekty tego etapu procesu zostały przedstawione przez autorów pracy [23]. Podczas cięcia dysku istotna jest grubość materiału i związany z tym odstęp między narzędziami tnącymi. W trakcie tłoczenia ważne są zarówno grubość materiału, jak i zmiana średnicy formatki. Wartości te muszą zostać odpowiednio dobrane, aby zapewnić płynny proces formowania i jakość wytworzonych kubków.



Rys. 4.1 Prasa pionowa kubka

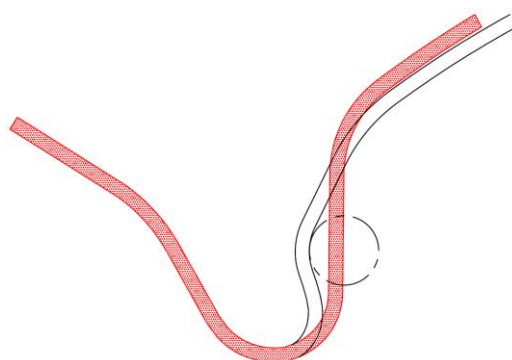
W kolejnym etapie, kubki trafiają do prasy poziomej (z ang. bodymaker) (Rys. 4.2), gdzie formowane są za pomocą stempla oraz zestawu matryc. Procesy przeróbki plastycznej metalu, które mają miejsce w tym urządzeniu, to: przetłaczanie, wyciąganie ścianki oraz kształtowanie denka.



Rys. 4.2 Prasy poziome (ang. bodymaker) ustawione równolegle na linii produkcyjnej

Wszystkie operacje formowania w prasie poziomej wykonywane są w trakcie jednego ruchu stempla. Podczas etapu przetłaczania następuje zmiana średnicy kubka do średnicy finalnej puszki, odbywa się to bez pocienienia ścianki wytłoczki [24]. Kolejnym krokiem formowania w prasie poziomej jest proces wyciągania ścianki polegający na zmniejszeniu grubości metalu w porównaniu do jego pierwotnej grubości. Odbywa się to zazwyczaj przy wykorzystaniu

trzech matryc oraz stempla. W trakcie tych operacji otrzymywana jest ostateczna grubość środkowej oraz górnej ścianki puszki. W pracy [25] została przeanalizowana istotność części parametrów tego etapu formowania. Redukcja grubości ścianki, między pierwszą a drugą matrycą, powinna odbywać się w zrównoważony sposób i wynosić około 24%. Głównym kryterium dla redukcji na trzeciej matrycy jest redukcja grubości mniejsza niż 40%. Kiedy stempel formujący oraz puszka opuszczają ostatnią matrycę, trafiają na zespół narzędzi do formowania denka puszki. W etapie tym z prostej podstawy pojemnika formowane jest denko w kształcie czaszy. Denko puszki jest istotne ponieważ jest to obszar puszki, który musi przeciwdziałać ciśnieniu panującemu w puszcze po napełnieniu jej napojem [26]. Wynikowym produktem tych operacji jest puszka o prostych ściankach, która zostaje następnie wysłana do maszyny wyrównującej jej górną krawędź. Kolejny proces formowania ma miejsce w maszynie nazywanej zawężarko-krawędziarką. Odbywa się to na końcu procesu produkcyjnego po etapach mycia z suszeniem, nanoszenia litografii i jej utwardzania oraz natrysku lakieru wewnętrznego wraz z jego suszeniem. Proces zawężania polega na stopniowym zmniejszaniu średnicy górnej części puszki. W trakcie przechodzenia przez 14 stacji zawężających, puszka poddawana jest stopniowemu zawężaniu, poprzez wciśnięcie jej w matrycę przy jednoczesnym wsunięciu do jej wnętrza pilota prowadzącego. Jest to proces, w którym górna ścianka puszki o grubości większej niż jej środkowa część poddawana jest ścisaniu, dlatego w trakcie tego etapu ścianka puszki ulega pogrubieniu. Kluczową rolę w tym procesie odgrywa jednorodna grubość materiału, zastosowany lakier wewnętrzny oraz zewnętrzny nadruk. Ostatnim etapem formowania w zawężarko-krawędziarce jest powstawanie kołnierza puszki, który służy do połączenia puszki z wieczkiem oraz kształtowanie rowka u podstawy puszki.

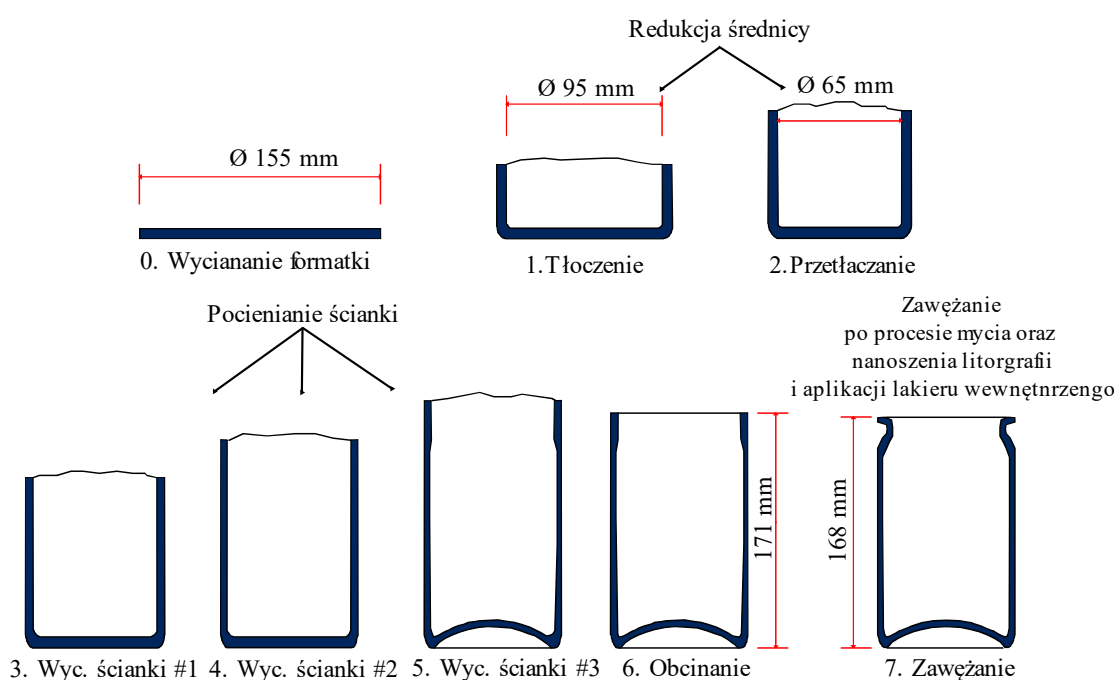


Rys. 4.3 Schemat formowania rowka po wewnętrznej stronie podstawy puszki

Tworzenie rowka u podstawy puszki jest operacją opcjonalną, ma ona na celu zwiększenie wytrzymałości denka puszki przy obciążeniu wewnętrznym ciśnieniem [27]. Uformowany rowek zwiększa odporność ciśnieniową denka o około 100 kPa. Po tym etapie, puszki

przewożone są na przenośnikach taśmowych do sekcji pakowania i układania w stosy na paletach transportowych.

Dogłębne poznanie wszystkich procesów formowania aluminiowej puszki napojowej, które zachodzą na linii produkcyjnej jest niezwykle ważne. Każdy krok procesu wpływa na ostateczną jakość puszki, a ewentualne niedoskonałości powstałe we wcześniejszych etapach mogą mieć efekt domina na całej linii produkcyjnej, wpływający na wydajność produkcji. Dobra jakość kubka na początku procesu stanowi fundament dla późniejszych etapów formowania. Niedoskonałości kubka mogą prowadzić do trudności w kolejnych etapach i wpływać na jakość całej puszki. Szczegółowe zrozumienie procesów formowania metalu pozwala zidentyfikować kluczowe punkty i optymalizować każdy z nich aby uzyskać wysokiej jakości produktu. Poprawa procesu produkcyjnego przyczynia się to również do redukcji odpadów, poprawy efektywności i zapewnieniu, że puszki spełniają wymagania specyfikacji i standardów. W obecnych warunkach rynkowych, w których popyt na aluminiowe puszki do napojów jest ogromny, efektywna produkcja wysokiej jakości puszek jest kluczowa. Dzięki usprawnieniu procesów formowania metalu można zwiększyć wydajność produkcji i zaspokoić rosnący popyt, co przyczynia się również do bardziej zrównoważonego i dochodowego procesu produkcji. W kolejnym rozdziale przybliżone zostały wybrane teoretyczne aspekty procesu formowania aluminiowej puszki napojowej, aby jeszcze lepiej poznać mechanizmy zachodzące podczas jej powstawania.

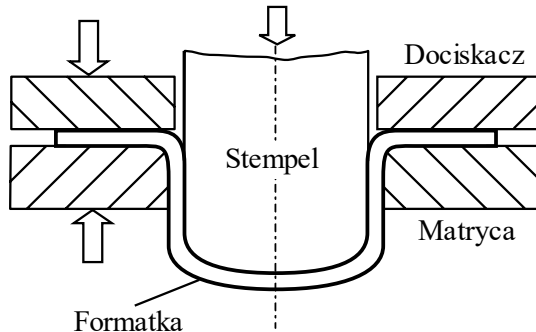


Rys. 4.4 Główne etapy formowania aluminiowej puszki napojowej o pojemności 500 ml

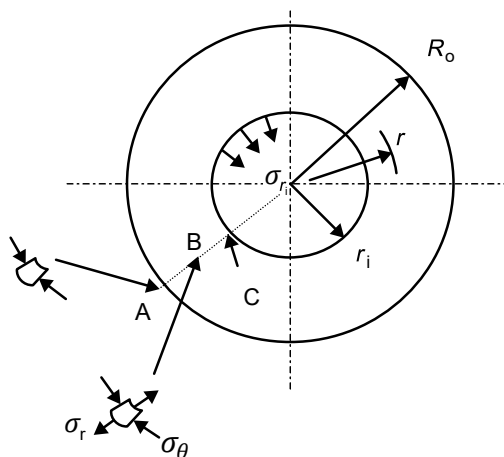
4.1 Głębokie tłoczenie

Głębokie tłoczenie płaskodennych wytłoczek, potocznie zwanych kubkami jest stosunkowo prostym procesem. Proces ten stosowany jest np. przy produkcji łusek nabojów [28], baterii [29], zbiorników LPG [30] oraz stalowych i aluminiowych puszek napojowych. W trakcie tego procesu, zilustrowanego na Rys. 4.5, istnieją dwie ważne strefy w wytłoczce: kołnierz wytłoczki gdzie występuje największy poziom odkształceń oraz ścianka wytłoczki, która musi wytrzymać siłę potrzebną do zajścia deformacji na kołnierzu. Jeżeli średnica stempla tłoczącego jest zbyt duża, siła w ściance może przekroczyć jej wytrzymałość, co prowadzi do zniszczenia wytłoczki. Nakłada to ograniczenie dla tego typu procesu, opisanie za pomocą współczynnika wytłaczania, który określa największy możliwy do wytłoczenia stosunek średnicy R_0/r_i . Kołnierz wytłoczki w procesie tłoczenia można przedstawić w postaci pierścienia tak jak zaprezentowano to na Rys. 4.6. Naprężenia działające na element kołnierza w miejscu oddalonym od osi stempla o r zostały przedstawione na Rys. 4.7, a równanie równowagi dla tego elementu, w przypadku braku tarcia zaprezentowane jest poniżej [31]:

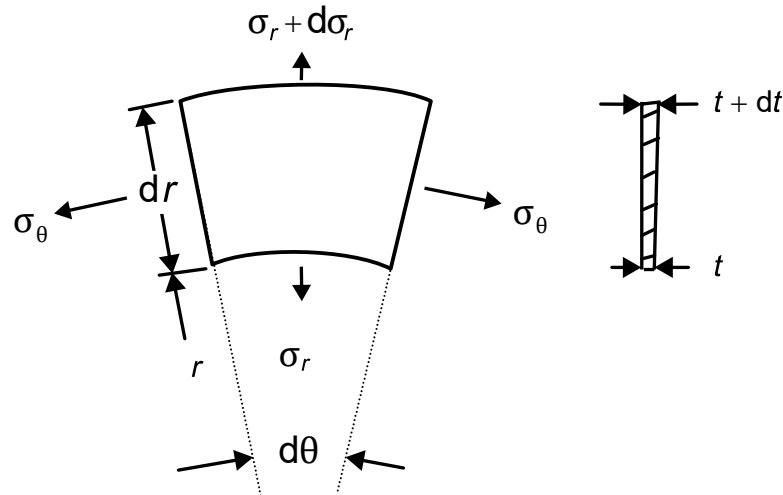
$$(\sigma_r + d\sigma_r)(t + dt)(r + dr)d\theta = \sigma_r t r d\theta + \sigma_\theta t dr d\theta \quad (4.1)$$



Rys. 4.5 Tłoczenie cylindrycznej wytłoczki z okrągłej formatki



Rys. 4.6 Pierścieniowy kołnierz formowanej wytłoczki [31]



Rys. 4.7 Element kołnierza wytłoczki znajdujący się na jej średnicy r [31]

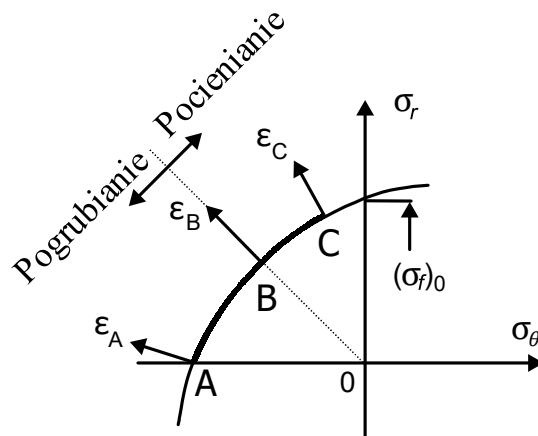
a po zredukowaniu:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r}{t} \frac{dt}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \quad (4.2)$$

Na zewnętrznym brzegu kołnierza, w punkcie A, znajduje się swobodna powierzchnia dlatego σ_r w tym miejscu wynosi 0. Stan naprężeń jest zatem jednoosiowym ściskaniem, w którym $\sigma_\theta = -\sigma_f$, a naprężenie σ_f jest aktualnym naprężeniem uplastyczniającym. Natomiast na pewnym pośrednim promieniu, w punkcie B naprężenia promieniowe będą równe i przeciwnie skierowane do naprężeń obwodowych, podczas gdy na wewnętrznym brzegu, w punkcie C naprężenia promieniowe będą maksymalne. Stan naprężeń i odpowiadające im wektory odkształcenia są przedstawione na Rys. 4.8 kryterium płynięcia plastycznego Von Mises'a na płaszczyźnie $\sigma_r - \sigma_\theta$. Na zewnętrznym brzegu w punkcie A, w miarę rosnącego odkształcenia blacha będzie się pogrubiać, podczas gdy w punkcie B nie będzie występować zmiana grubości. Natomiast w punkcie C kołnierza materiał będzie się poceniał. W ogólnym efekcie, podczas procesu tłoczenia całkowita powierzchnia materiału, w początkowej fazie w postaci kołnierza, nie zmieni się po procesie formowania. Jest to przydatne przybliżenie, pomocne przy określaniu średnicy formatki.

Rozważając początkowy etap procesu oraz wykorzystując kryterium uplastycznienia Treski możemy zapisać:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = -(\sigma_f)_0 \quad (4.3)$$



Rys. 4.8 Stan naprężeń oraz wektory odkształceń w różnych miejscach kołnierza wytłoczki [31]

gdzie $(\sigma_f)_0$ to naprężenie uplastyczniające. Dla początkowego etapu procesu, grubość $t = t_0$, zakładając warunki brzegowe $\sigma_r = 0$ na zewnętrznym promieniu R_0 oraz dla promienia wewnętrznego r_i przyjmując że $\sigma_r = \sigma_{ri}$ otrzymujemy:

$$\sigma_{ri} = -(\sigma_f)_0 \ln \frac{r_i}{R_0} \quad \text{oraz} \quad \sigma_{\theta i} = -\{(\sigma_f)_0 - \sigma_{ri}\} \quad (4.4)$$

Dla materiału nieumacniającego się odkształceniowo, naprężenia promieniowe zgodnie z równaniem (4.4) będą największe na początku tłoczenia i będą maleć wraz z zmniejszaniem się zewnętrznego promienia. Zgodnie z kryterium Treski, największe naprężenia jakie może przenieść ścianka wytłoczki to naprężenia $(\sigma_f)_0$. Podstawienie za $\sigma_{ri} = (\sigma_f)_0$ do równania (4.4), wskazuje, że największa możliwa do wytłoczenia formatka musi spełniać zależność [31]:

$$\frac{R_0}{r_i} = e \approx 2,72 \quad (4.5)$$

Należy pamiętać, że są to jednak obliczenia, które nie uwzględniają:

1. Efektów tarcia: równanie (4.4) nie uwzględnia wpływu tarcia między narzędziem a materiałem. W rzeczywistości, tarcie może powodować dodatkowe opory podczas procesu tłoczenia, co zmniejsza maksymalne naprężenie promieniowe jakie może wytrzymać materiał.
2. Efektów sprężystości: równanie (4.4) opisuje stan naprężenia w stanie plastycznym, ale nie uwzględnia sprężystych odkształceń materiału. W rzeczywistości, materiał podczas formowania może wykazywać pewne sprężyste odkształcenia, które mogą wpływać na maksymalne naprężenie promieniowe.

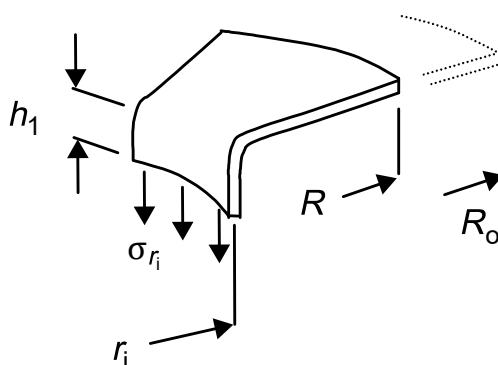
3. Heterogeniczności materiału: równanie (4.4) zakłada jednorodność i izotropię materiału. W rzeczywistości, materiał może posiadać defekty w strukturze lub zmienne własności, co wpływa na jego zdolność do przenoszenia obciążeń.
4. Nie uwzględniono procesu odkształcania: równanie (4.4) opiera się na założeniu, że proces tłoczenia odbywa się stopniowo i jednorodnie. W rzeczywistości, procesy odkształcania mogą być bardziej skomplikowane, a zmiany w geometrii i naprężeniach wytłoczki mogą wpływać na rzeczywistą wytrzymałość materiału.

Z powyższych powodów wartość wyznaczonego na podstawie równania (4.4) współczynnika może być przeszacowana i wymagać wprowadzenia dodatkowych parametrów uwzględniających rzeczywiste warunki procesu.

4.1.1 Wpływ umocnienia materiału

Jeśli w materiale występuje umocnienie odkształceniowe, naprężenia potrzebne do przetłoczenia kołnierza mogą wzrastać w trakcie procesu tłoczenia, pomimo zmniejszającej się średnicy kołnierza. W miarę postępu tłoczenia, zewnętrzny promień będzie się zmniejszał i w danym momencie wyniesie wartość R , tak jak zaprezentowano to na Rys. 4.9. Ze względu na umocnienie odkształceniowe wartość naprężenia płynięcia będzie się zwiększać oraz nie będzie stała na obwodzie kołnierza. Jeżeli przyjmiemy uśrednioną wartość $(\sigma_f)_{\text{średnie}}$ na całym obwodzie kołnierza oraz pominiemy nierównomierność grubości, wtedy równanie (4.4) przyjmie postać:

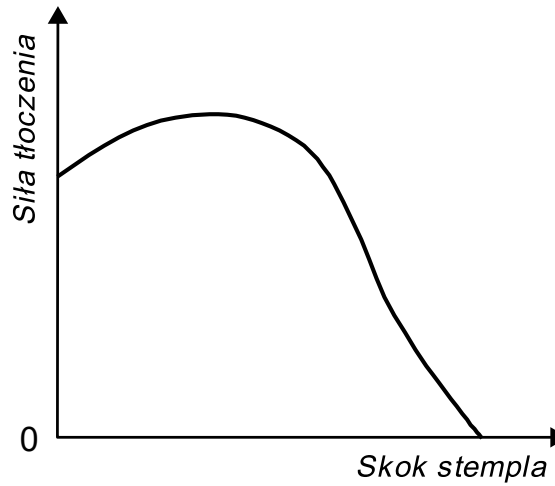
$$\sigma_{r_i} = -(\sigma_f)_{\text{średnie}} \ln \frac{r_i}{R_0} \quad (4.6)$$



Rys. 4.9 Fragment kołnierza w trakcie procesu tłoczenia w warunkach braku tarcia [31]

Istnieją zatem dwa przeciwstawne czynniki wpływające na siłę tłoczenia, jeden zwiększający siłę w związku z umocnieniem odkształceniowym materiału oraz drugi redukujący tą siłę,

czyli zmniejszająca się średnica R kołnierza. Typowy wykres przebiegu siły tłoczenia został przedstawiony na Rys. 4.10.



Rys. 4.10 Typowy wykres przebiegu siły tłoczenia w funkcji przemieszczenia stempla tłoczącego dla materiału umacniającego się odkształceniowo

4.1.2 Wpływ tarcia

Tarcie w procesie tłoczenia występuje w dwóch miejscach i wpływa na poziom siły tłoczenia. Pierwszym z tych miejsc jest promień matrycy, dla którego w przypadku zmian w grubości kołnierza, możemy opisać naprężenia w materiale przesuwającym się wzdłuż promienia matrycy w następujący sposób [31]:

$$\frac{d\sigma_\phi}{\sigma_\phi} = \mu d\phi \quad (4.7)$$

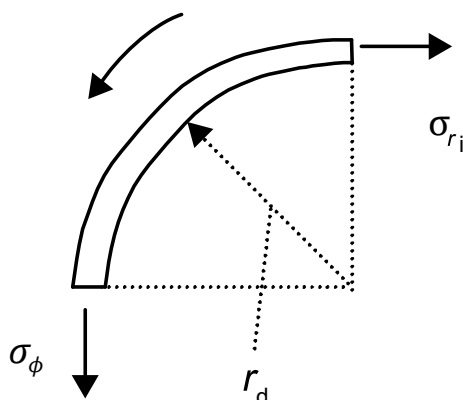
a po całkowaniu, na promieniu matrycy, tak jak zaprezentowano na Rys. 4.11, otrzymamy:

$$\sigma_\phi = \sigma_{r_i} \exp \mu \frac{\pi}{2} \quad (4.8)$$

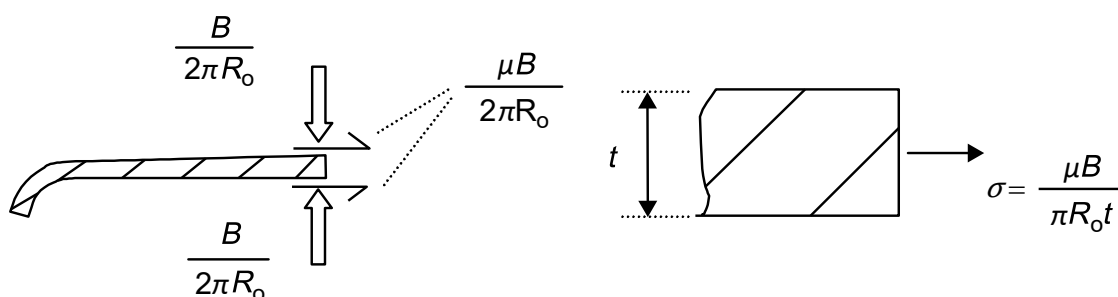
Tarcie pomiędzy dociskaczem, a kołnierzem wytłoczki również powoduje wzrost siły tłoczenia. Wystarczającym przybliżeniem jest założenie, że siła B dociskająca kołnierz jest rozłożona równomiernie wokół krawędzi kołnierza jako siła liniowa o wartości $B/2\pi R_0$ na jednostkę długości (Rys. 4.12). Siła tarcia na kołnierzu, na jednostkę długości obwodu kołnierza wynosi zatem $2\mu B/2\pi R_0$. Może to zostać przedstawione jako naprężenia działające na krawędź kołnierza:

$$(\sigma_r)_{r=R_0} = \frac{\mu\pi}{\pi R_0 t} \quad (4.9)$$

gdzie t oznacza grubość formatki.



Rys. 4.11 Przesuwanie się kołnierza wytłoczki na promieniu matrycy w trakcie procesu tłoczenia [31]

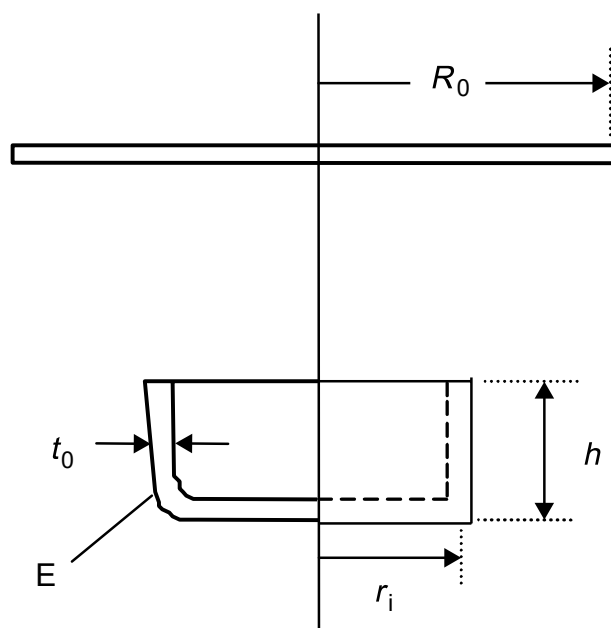


Rys. 4.12 Siła tarcia wynikająca z siły nacisku dociskacza oraz założenie jej działania na zewnętrzną krawędź kołnierza [31]

4.1.3 Wysokość wytłoczki

Jeżeli z okrągłej formatki, ma zostać stworzona w procesie tłoczenia cylindryczna wytłoczka w postaci kubka, jej wysokość jest zdeterminowana głównie przez średnicę formatki. Jak wspomniano we wcześniejszym rozdziale, podczas tłoczenia, kołnierz formatki zwiększa swoją początkową grubość, co sprawia że górna część ścianki kubka również ma grubość większa niż materiał wsadowy (Rys. 4.13). Najcieńszy obszar wytłoczki znajduje się blisko podstawy w punkcie E , gdzie materiał jest zginany i rozciągany na promieniu stempla. W pewnym punkcie w połowie wysokości ścianki kubka, grubość ścianki będzie taka sama jak początkowa grubość materiału. Przybliżona wartość wysokości kubka może zostać uzyskana poprzez założenie, że składa się on z okrągłej podstawy i cylindrycznej ścianki, tak jak pokazano po prawej stronie schematu kubka na Rys. 4.13 oraz że grubość ścianki kubka jest wszędzie taka sama i równa się grubości formatki. Porównując takie same objętości formatki oraz kubka [31]:

$$\pi R_0^2 t_0 = \pi r_i t_0 + 2\pi r_i t_0 h \quad (4.10)$$



Rys. 4.13 Formatka o początkowej średnicy R_0 i grubości t_0 , przetłoczona do kubka o wysokości h [31]

można wyznaczyć wysokość kubka opisaną równaniem:

$$h \approx \frac{r_i}{2} \left\{ \left(\frac{R_0}{r_i} \right)^2 - 1 \right\} \quad (4.11)$$

Współczynnik wytlaczania jest zazwyczaj mniejszy niż 2,2. Równanie (4.10) pokazuje że wysokość kubka dla takiego stosunku jest niemalże dwukrotnie większa od jego promienia. Innymi słowy stosunek wysokości do średnicy kubka wynosi nieco mniej niż jeden, a jeżeli wymagany jest kubek o wyższych ściankach stosuje się proces przetłaczania.

4.1.4 Powstawanie defektu typu „ucha”

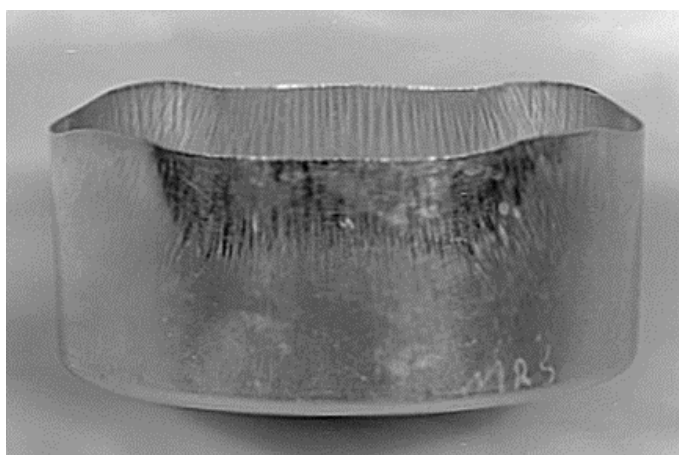
Powstały w procesie tłoczenia kubek, zazwyczaj charakteryzuje się nierówną górną krawędzią (Rys. 4.14). Nierówne fragmenty górnej krawędzi kubka nazywane są uchami, ich liczba może wynosić dwa, cztery lub sześć. Ucha są efektem anizotropii własności materiału, dlatego ich wysokość oraz pozycja kątowa jest skorelowana z parametrem R czyli stosunkiem odkształceń plastycznych materiału na szerokości ε_w do odkształceń plastycznych na grubości ε_t :

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (4.12)$$

Dla dwóch albo czterech uch można to opisać zależnością [32]:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (4.13)$$

dla której jeżeli $R > 0$, to ucha pojawiają się na pozycji 0° i 90° , a jeżeli $R < 0$ to ucha powstaną na pozycji 45° względem kierunku walcowania. Jest to efekt niepożądany, ponieważ górna krawędź musi zostać zazwyczaj wyrównana poprzez jej obcięcie, a usunięty materiał stanowi odpad.



Rys. 4.14 Przykład ucha powstających na kubku w procesie tłoczenia

4.2 Przetłaczanie

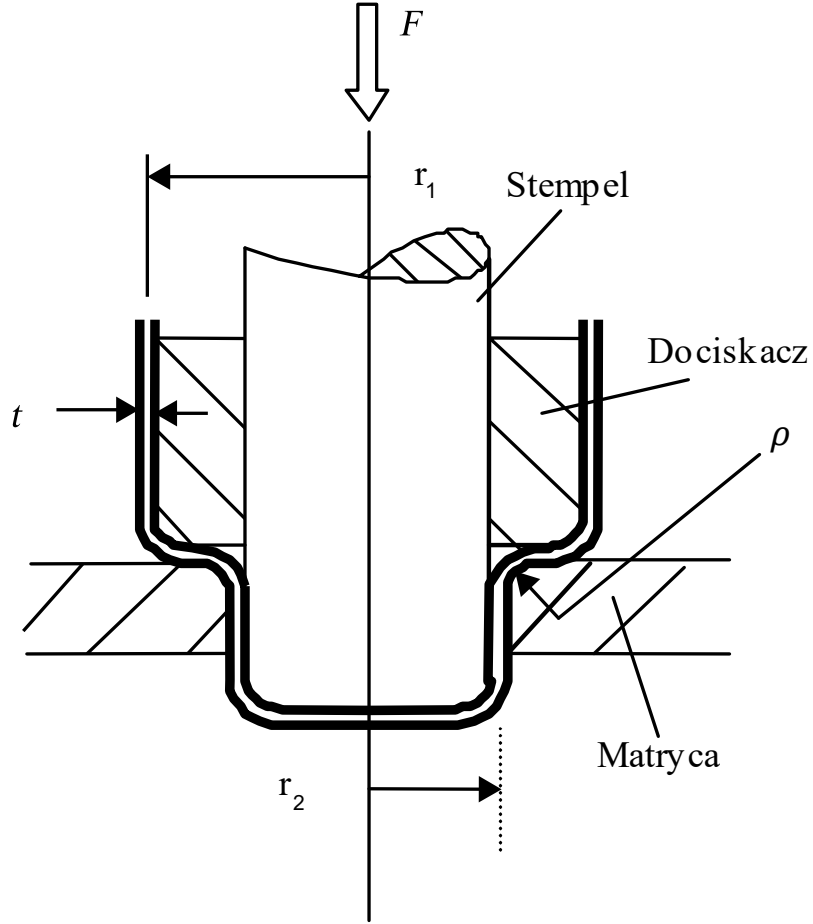
Ograniczenia operacji tłoczenia pozwalają wykonać jedynie płytkie kubki. Aby zwiększyć ich wysokość i jednocześnie zmniejszyć średnicę, stosuje się operację przetłaczania. Podobnie jak w procesie tłoczenia, zmiany grubości ścianek są niewielkie więc powierzchnia elementu pozostaje w przybliżeniu stała. Istnieją również ograniczenia redukcji średnicy kubka w tym procesie. Jeżeli stosunek średnicy kubka przed przetłaczaniem do docelowej średnicy jest zbyt wysoki, ścianka kubka zostanie rozerwana na skutek wygenerowanego w niej poziomu naprężeń. Na Rys. 4.15 kubek o średnicy r_1 i grubości t został przetłoczony bez zmiany grubości ścianki do kubka o mniejszej średnicy r_2 .

Zakładając że napięcie T [31] jest zdefiniowane jako:

$$T = \sigma t \quad (4.14)$$

gdzie t oznacza bieżącą grubość materiału, a napięcie w ścianie przetłaczanego kubka, pomiędzy jego dnem a matrycą wynosi T_ϕ , wtedy siła przetłaczania będzie wynosić:

$$F = 2\pi r_2 T_\phi \quad (4.15)$$



Rys. 4.15 Przetłaczanie kubka powstałego w procesie tłoczenia [31]

Zakładając że napięcie uplastyczniające $\bar{T}$ pozostaje stałe, napięcie w ścianie wytłoczki można wyrazić wzorem:

$$T_{\phi} = \bar{T} \ln \frac{r_1}{r_2} = \sigma_f t \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (4.16)$$

Po przyjęciu uproszczeń w postaci naprężenia płynięcia przyjętego jak dla płaskiego stanu odkształceń, wartości jeden dla współczynnika sprawności η oraz pominięcia T/T_y , ponieważ napięcia te w procesie przetłaczania nie są przeważnie wysokie, możemy wykazać że wzrost wartości napięcia dla zginania lub rozginania będzie wynosił:

$$\Delta T_{\phi} \approx \frac{\sigma_f t^2}{4\rho} \quad (4.17)$$

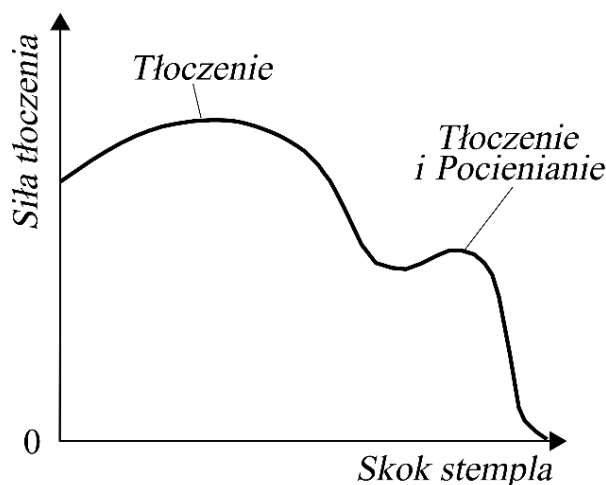
Na Rys. 4.15 można zauważyć że w procesie przetłaczania istnieją dwie operacje zginania oraz rozginania. Łącząc ze sobą równania (4.15), (4.16) oraz (4.17) możemy wyznaczyć zależność na wartość siły tłoczenia w procesie przetłaczania:

$$F \approx 2\pi t(T_\phi + 4\Delta T) = 2\pi r_2 t \sigma_f \left(\ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{t}{\rho} \right) \quad (4.18)$$

Dzięki temu, można zauważyć że siła przetłaczania F rośnie wraz z większą redukcją średnicy i przy zmniejszającym się stosunku współczynnika zginania ρ/t .

4.3 Wyciąganie ścianki

Wyciąganie ścianki puszki to proces wymuszonej redukcji grubości ścianki, co jednocześnie prowadzi do zwiększenia wysokości wytłoczki. Proces ten jest stosowany nie tylko w produkcji aluminiowych puszek napojowych ale także na przykład przy wytwarzaniu zbiorników na sprężony gaz ziemny (CNG) [33]. Częściowe pocienianie ścianki może zachodzić już w procesie tłoczenia. W takim przypadku siła pochodząca od pocieniania sumuje się z siłą pochodzącą od procesu tłoczenia (Rys. 4.16). Ponieważ pocienianie w procesie tłoczenia zachodzi dopiero pod jego koniec, nie powoduje ono uszkodzenia wytłoczki.



Rys. 4.16 Wykres sił występujący w procesie tłoczenia z pocienianiem [32]

Pocienianie ścianki jest zazwyczaj procesem osobnym występującym po tłoczeniu i przetłaczaniu. W produkcji aluminiowej puszek napojowej, proces pocieniania ścianki jest wykorzystywany do około trzykrotnego zwiększenia wysokości ścianki. Oczywiście istnieje limit redukcji grubości przy przejściu przez jedną matrycę, ponieważ zbyt duża redukcja grubości może spowodować rozerwanie ścianki przenoszącej obciążenie. Pocienienie ścianki może zostać przeprowadzone za pomocą stempla oraz pierścieniowych matryc, tak jak zostało to przedstawione na Rys. 4.17, a dzieje się to w szczelinie pomiędzy stemplem a pierścieniem, której wielkość jest mniejsza od grubości ścianki kubka. Ponieważ stempel

musi pozostać w ciągłym kontakcie z denkiem kubka, prędkość materiału na wyjściu z pierścienia ϑ_p jest taka sama jak prędkość stempla. Podczas procesu pocieniania ścianki, nie występuje zmiana objętości materiału dlatego tempo z jakim materiał wchodzi oraz wychodzi ze szczeliny tłoczącej jest takie samo. Można więc przyjąć że:

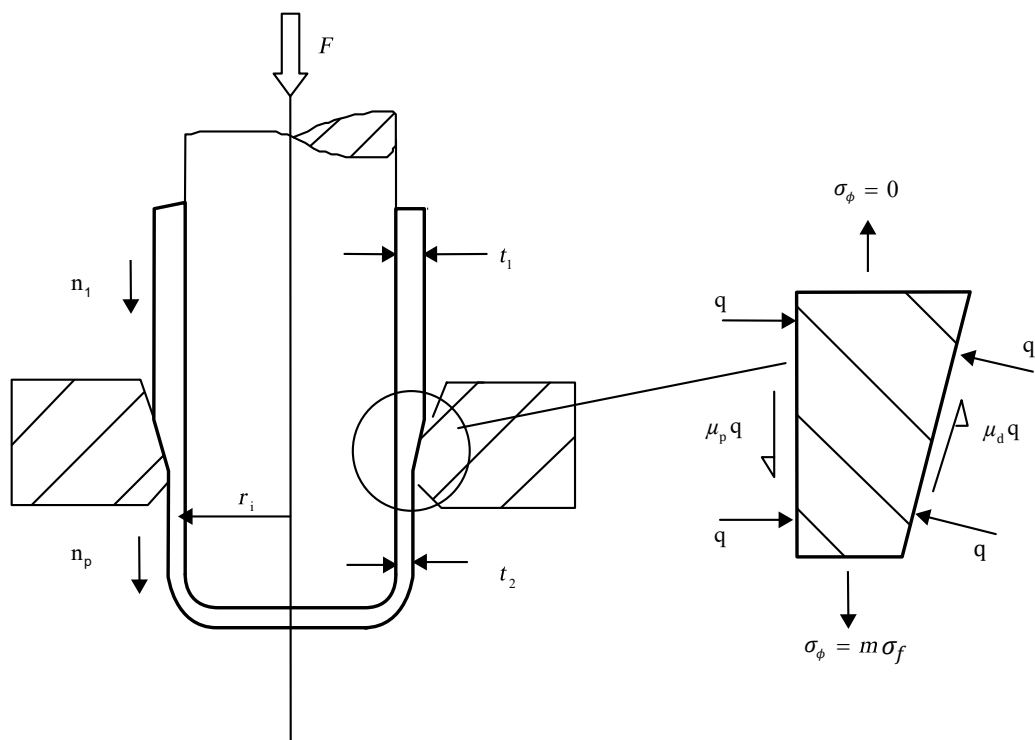
$$2\pi r_i t_1 \vartheta_1 = 2\pi r_i t_2 \vartheta_p \quad (4.19)$$

lub

$$\vartheta_1 = \vartheta_p \frac{t_2}{t_1} \quad (4.20)$$

Materiał przed szczeliną formującą porusza się natomiast wolniej niż stempel tłoczący. W trakcie tego procesu pojawiają się dwie siły tarcia, jedna generowana w kontakcie pomiędzy stemplem a materiałem, druga pomiędzy materiałem a matrycą. Siła tarcia pomiędzy stemplem a materiałem wspomaga proces pocieniania, a pomiędzy materiałem a matrycą jest siłą niekorzystną. Pożądane jest dlatego aby w tym procesie współczynnik tarcia μ_p po stronie stempla był wysoki. Po stronie matrycy natomiast, współczynnik tarcia μ_d powinien być jak najniższy dlatego zazwyczaj stosuje się z tej strony środek smarny. Możliwe jest stworzenie przybliżonego modelu takiego procesu, dla idealnie plastycznego materiału o naprężeniu uplastyczniającym $\sigma_f = constant$. Przyjmując kryterium uplastycznienia Treski, naprężenia poprzeczne na wejściu materiału, gdzie naprężenia osiowe wynoszą zero, wynoszą $-\sigma_f$ oraz:

$$q = -\sigma_t = \sigma_f \quad (4.21)$$



Rys. 4.17 Proces pocieniania ścianki wylóczki [31]

Na wyjściu materiału z szczeliny formującej, naprężenia osiowe muszą być mniejsze od naprężeń uplastyczniających aby odkształcenie plastyczne materiału zachodziło tylko w szczeliny formującej. Jak pokazano na Rys. 4.17, naprężenie to wynosi $m\sigma_f$ gdzie $m < 1$, naprężenia poprzeczne wynoszą $\sigma_t = -(\sigma_f - m\sigma_f)$, natomiast naprężenia na wyjściu są równe:

$$q = \sigma_t = \sigma_f(1 - m) \quad (4.22)$$

Średnie ciśnienie w kontakcie wynosi natomiast:

$$\bar{q} = \sigma_f \frac{1 + (1 - m)}{2} = \sigma_f \left(1 - \frac{m}{2}\right) \quad (4.23)$$

Siły działające w strefie odkształcenia zostały przedstawione na Rys. 4.18, a równanie równowagi sił działających w kierunku osiowym możemy zapisać:

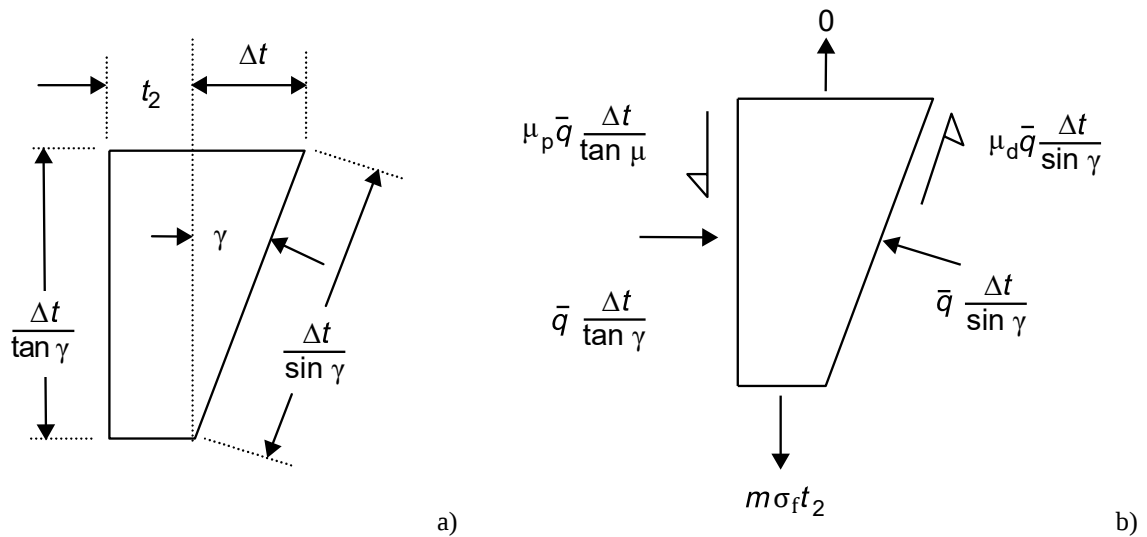
$$mYt_2 + \mu_p \bar{q} \frac{\Delta t}{\tan \gamma} = \mu_p \bar{q} \frac{\Delta t}{\sin \gamma} \cos \lambda + \bar{q} \frac{\Delta t}{\sin \lambda} \sin \gamma \quad (4.24)$$

Podstawiając równanie (4.23) otrzymamy:

$$\frac{|\Delta t|}{t_2} = \frac{2m}{2-m} * \frac{1}{\left\{1 - \frac{(\mu_p - \mu_d)}{\tan \gamma}\right\}} \quad (4.25)$$

Ograniczeniem w tym przypadku będzie współczynnik $m = 1$:

$$\left(\frac{|\Delta t|}{t_2}\right)_{max} = \frac{1}{\left\{1 - \frac{(\mu_p - \mu_d)}{\tan \gamma}\right\}} \quad (4.26)$$

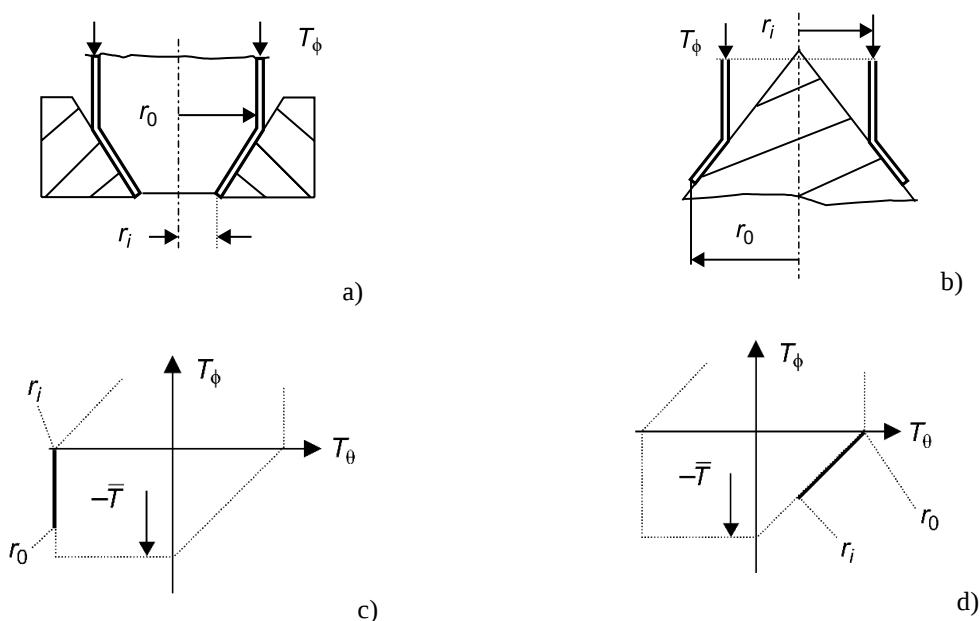


Rys. 4.18 Kształt strefy odkształcenia w procesie pocieniania ścianki puszki a) Siły działające w strefie odkształcenia w procesie pocieniania ścianki puszki b) [31]

Równanie (4.26) określa maksymalną redukcję grubości podczas procesu pocieniania ścianki. Maksymalną redukcję można uzyskać gdy $\mu_p > \mu_d$, czyli jak wspomniano wcześniej, gdy tarcie pomiędzy stemplem a materiałem jest wysokie. Możliwa jest większa redukcja grubości przy zastosowaniu większej ilości matryc ustawionych równolegle. W takim przypadku, należy pamiętać aby pocienianie nie odbywało się jednocześnie w więcej niż jednej matrycy. Takie ustawienie matryc zapobiega nadmiernemu wyężeniu ścianek poniżej obszaru deformacji. Przy produkcji aluminiowych puszek napojowych stosuje się trzy matryce oraz odpowiednie dystanse, a grubość ścianki jest zmniejszana do około jednej trzeciej pierwotnej grubości. Pozwala to uzyskać znaczną wysokość puszki przy niewielkich grubościach ścianki.

4.4 Zawężanie

Aktualne zasady projektowania dla obróbki na zimno i formowania szyjki oraz kołnierza cienkościennych elementów cylindrycznych takich jak łożyska sferyczne [34], rurowe osie samochodowe [35], łuski nabojoye [36], butelki aluminiowe [37] czy puszki napojowe są głównie wynikiem zgromadzonego doświadczenia producentów oraz dostawców narzędzi. Proces zawężania prowadzony jest w przemyśle dla różnych metali m.in. stali, miedzi [38] oraz aluminium [39], zarówno w temperaturze otoczenia oraz podwyższonej [40]. W dostępnej literaturze badawczej nie ma systematycznych badań dotyczących zawężania cienkościennych elementów cylindrycznych [39]. Często stosuje się metody prób i błędów w celu określenia zakresów wykonalności oraz pożądaných kształtów. W rezultacie, istnieje luka w wiedzy dotycząca wpływu parametrów zawężania na płynięcie materiału, opisu odkształcenia materiału oraz odkształcalności granicznej w tym procesie. Pierwsze badania w dziedzinie zawężania cienkościennych elementów cylindrycznych zostały opublikowane niedawno [41], autorzy przedstawili analityczny model do obliczenia kształtu, współczynnika redukcji, prędkości odkształcenia za pomocą macierzy sferycznych. W swojej książce Zbigniew Marcinak i inni [31] opisują dwa procesy zbliżone do procesu zawężania oraz krawędziowania puszki napojowej. Dla procesów tych, przedstawionych na Rys. 4.19 a) i Rys. 4.19 b), można wyznaczyć napięcie materiału w procesie zawężania. Napięcia dla procesu zawężania leżą w trzeciej ćwiartce na wykresie przedstawionym na Rys. 4.19 c), a dla procesu rozszerzania w czwartej Rys. 4.19 d).

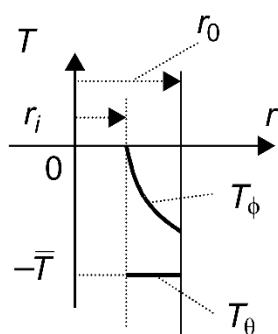


Rys. 4.19 Schemat procesu zawężania a), krawędziowania b). Lokalizacja napięcia dla procesu zawężania c), oraz procesu krawędziowania b)

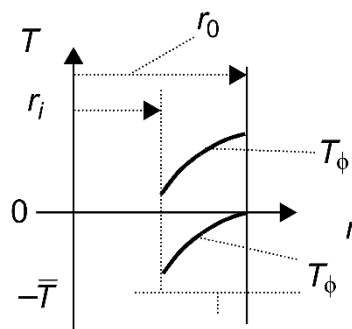
Dla $T_\phi = 0$ na promieniu r_i napięcia w procesie zawężania wynoszą:

$$T_\phi = -\bar{T} \left(1 - \frac{r_i}{r}\right) \text{ oraz } T_\theta = -\bar{T} \quad (4.27)$$

Przedstawiono to również na rysunku Rys. 4.20 e).



e)



f)

Rys. 4.20 Napięcie dla r_0 w procesie zawężania e) oraz krawędziowania f)

W procesie rozszerzania/krawędziowania, napięcia dla $T_\phi = 0$ na promieniu r_i wynoszą:

$$T_\phi = -\bar{T} \ln \frac{r_0}{r} \text{ oraz } T_\theta = \bar{T} + T_\phi = \bar{T} \left(1 - \ln \frac{r_0}{r}\right) \quad (4.28)$$

Co zostało przedstawione na rysunku Rys. 4.20 f).

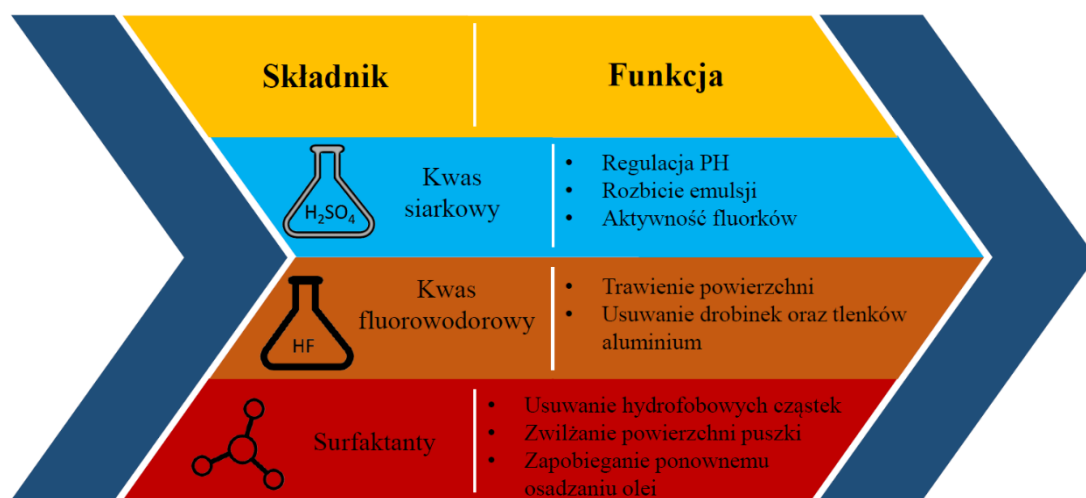
5 Etapy pośrednie w procesie produkcyjnym puszki

Poza etapami przeróbki plastycznej, na mechaniczne własności gotowej puszki wpływ mają również tzw. etapy pośrednie. W skład wspomnianych etapów wchodzi: mycie puszki z suszeniem, aplikacja i utwardzanie lakieru wewnętrznego oraz litografii. Są to etapy w których nie występuje zmiana kształtu puszki ale temperatura oraz nałożone w tych krokach warstwy lakieru mają widoczny wpływ na końcową wytrzymałość puszki.

5.1 Mycie puszki

Myjka puszek napojowych ma głównie za zadanie oczyścić zarówno zewnętrzną, jak i wewnętrzną część puszki, przygotowując ją do kolejnych procesów produkcyjnych. W trakcie działania myjki usuwane są pozostałości chłodziwa, oleju i drobinek aluminium pochodzących z procesu formowania puszki w prasach poziomych. Cały proces mycia puszek składa się z kilku etapów:

Pierwszym z nich jest etap płukania wstępnego, płyn z tego kroku może trafić bezpośrednio do utylizacji bądź zostać poddany procesowi odzysku [42]. Przed przetransportowaniem puszek do kolejnego etapu mycia wstępnego, puszki przechodzą przez kurtynę powietrzną, tak aby zminimalizować ilość substancji przenoszanej na puszcze do kolejnej strefy. W etapie mycia wstępnego do mycia puszki wykorzystywany jest już roztwór z niską koncentracją środków myjących, co wpływa na dokładniejsze oczyszczenie puszki i przygotowanie jej do etapu mycia zasadniczego. Podczas mycia zasadniczego puszki są natryskiwane, pod wysokim ciśnieniem, specjalnie przygotowanym roztworem stanowiącym mieszaninę kwasu siarkowego i fluorowodorowego z dodatkiem środków powierzchniowo czynnych.



Rys. 5.1 Składniki chemiczne wykorzystywane w procesie mycia aluminiowej puszki napojowej

Celem mycia puszek kwasami jest usunięcie z powierzchni puszek zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych oraz drobin materiału. Aby usunąć pozostałości związków chemicznych z etapu mycia, puszka jest płukana w kolejnej stacji. Po płukaniu, puszki trafiają do stacji w której nanoszona jest warstwa konwersyjna. Powłoka ta stosowana jest głównie jako inhibitor korozji [43]. Powłoka konwersyjna poprawia również adhezję zewnętrznych i wewnętrznych powłok nanoszonych na puszkę. W kolejnej stacji płuczącej, następuje usunięcie pozostałości warstwy konwersyjnej. Następnie puszki trafiają do stacji, w której płukane są wodą dejonizowaną. Płukanie puszek wodą dejonizowaną ma na celu uzyskanie puszek pozbawionych jakichkolwiek zanieczyszczeń co jest niezbędne do otrzymania wysokiej jakości dekoracji zewnętrznej oraz wewnętrznej warstwy lakieru ochronnego. Po wszystkich etapach mycia puszka jest transportowana do urządzenia w którym następuje jej suszenie. Czas przebywania puszki w etapie suszenia jest dobierany doświadczalnie na podstawie kontroli wizualnej puszek opuszczających strefę suszenia. W temperaturze zbliżonej do 200°C puszka musi przebywać około 60 sekund, aby pozostała na niej woda

zprocesu mycia całkowicie odparowała. Puszka mogłaby być suszona dłużej, bądź w wyższej temperaturze, jednak z ekonomicznego oraz technologicznego punktu widzenia dąży się aby temperatury oraz czas były jak najniższe. Dodatkowo, wyższa temperatury na tym etapie miałaby jeszcze większy wpływ na spadek stopnia umocnienia materiału puszki, co przekłada się na spadek wytrzymałości tego opakowania. Ten kompleksowy proces mycia puszek zapewnia, odpowiednie przygotowane puszki do dalszych etapów produkcji.

5.2 Proces suszenia w piecu pinowym

Kolejnym etapem po procesie mycia puszek jest nanoszenie litografii zewnętrznej. W trakcie tego procesu, na zewnętrzną powierzchnię puszki наносzona jest grafika, zawierająca markę, logo producenta oraz informacje o zawartości. Wykonany na tym etapie nadruk nadaje również puszcze unikalny wygląd. Ponieważ po procesie naniesienia litografii, na zewnętrznej stronie puszki znajduje się nieutwardzony lakier, puszka w kolejnym kroku transportowana jest na specjalnym pręcie umieszczonym w jej wnętrzu. Od sposobu transportu puszki (Rys. 5.2) powstała nazwa urządzenia znanego jako „piec pinowy” lub „piec PIN”.

Piec pinowy to urządzenie używane w procesie produkcyjnym aluminiowych puszek napojowych do suszenia litografii. Ten specyficzny sposób przenoszenia puszki wewnątrz pieca, zapewnia stabilny transport i suszenie bez uszkodzenia zewnętrznego nadruku. Konstrukcja całego pieca jest pochylona o około 10 stopni od pionu, tak aby puszki nie spadały z pinów podczas transportu w piecu. Proces suszenia lakieru w piecu pinowym przebiega w przedziale temperatur od 195 do 210°C i trwa od 10 do 20 sekund.



Rys. 5.2 Fragment łańcucha pinowego z pieca PIN do suszenia litografii zewnętrznej

5.3 Proces suszenia w piecu IBO

Po wysuszeniu litografii puszki, trafia ona z powrotem na transporter, za pomocą którego przenoszona jest do urządzeń nanoszących lakier wewnętrzny. Jest to jeden z kluczowych etapów produkcji aluminiowej puszki napojowej. Naniesienie równomiernej warstwy lakieru wewnętrznego oraz jego odpowiednie utwardzenie jest ważne dla zagwarantowania długoterminowej szczelności puszki oraz bezpiecznego przechowywania jej zawartości. Aby zapewnić odpowiednie odizolowanie zawartości puszki od stopu aluminium, za pomocą dwóch dysz (Rys. 5.3) nanoszona jest warstwa lakieru o ściśle określonej grubości.

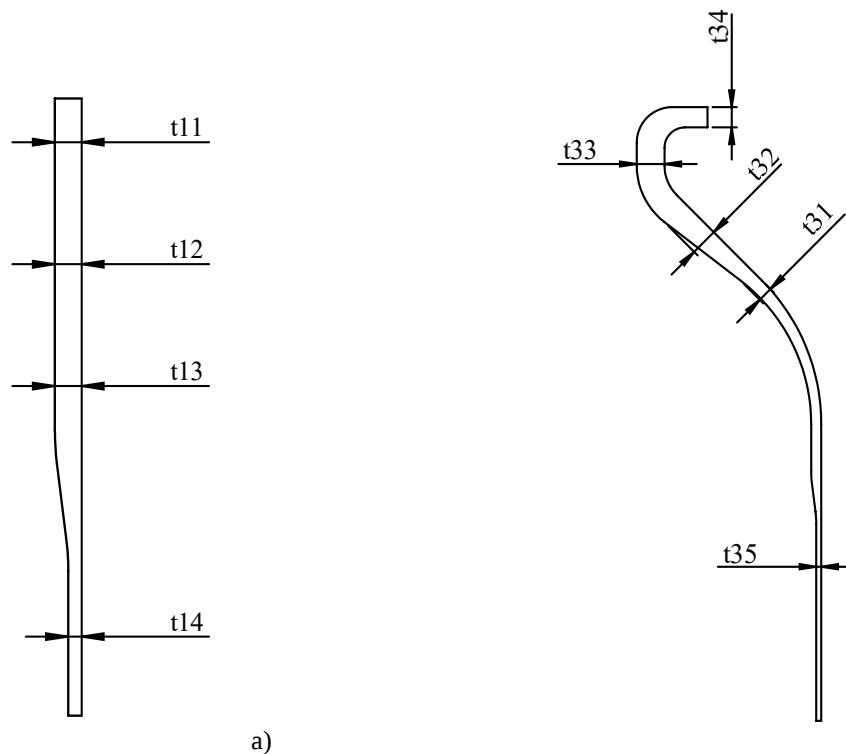


Rys. 5.3 Dysze do natrysku lakieru wewnętrznego

Puszka następnie trafia do pieca w którym następuje odparowanie rozpuszczalników oraz utwardzenie lakieru. W celu odpowiedniego wysuszenia lakieru wewnętrznego, stosuje się specjalnie do tego celu zaprojektowane urządzenia. Podczas suszenia lakieru wewnętrznego istotny wpływ odgrywa zarówno czas jak i temperatura suszenia, dlatego urządzenia do suszenia lakieru wewnętrznego posiadają trzy strefy suszenia. Odpowiednio dobrana temperatura i czas przebywania puszki w poszczególnych strefach gwarantuje stopniowe odparowywanie rozpuszczalników z całej objętości lakieru bez powstawania pęcherzy w jego strukturze. W ostatniej strefie, puszka oraz lakier wewnętrzny przebywają w temperaturze wynoszącej około 200°C. Lakier wewnątrz osiąga wtedy swoje ostateczne właściwości. Temperatura oraz czas przebywania puszki w tej strefie jest tak dobrany, że nie powoduje degradacji lakieru, przerwania jego ciągłości, powstania pęknięć lub spadku elastyczności.

6 Analiza stanu problemu, cel i teza pracy

W ostatnich latach znaczenie puszek napojowych zwiększyło się znacząco, między innymi ze względu na możliwość poddawania tych opakowań recyklingowi. Jednym z najpopularniejszych rodzajów produkowanych puszek napojowych jest dwuczęściowa puszka napojowa, która charakteryzuje się mniejszą średnicą w górnej jej części niż średnica korpusu. Pierwszą operacją w procesie powstawania dwuczęściowej puszek napojowej jest operacja wycinania okrągłych formatek z blachy aluminiowej. W kolejnym kroku, z wyciętej formatki, powstaje wytłoczka o średnicy większej niż średnica puszek. Operacja w której powstaje wytłoczka jest zwana operacją tłoczenia bądź głębokiego tłoczenia. Następnie wytłoczki transportowane są do kolejnego urządzenia gdzie następuje przetłaczanie oraz trzyetapowe pocienianie ścianki wytłoczki. Ostatnim etapem formowania w tym urządzeniu jest kształtowanie denka puszek. Zaraz po etapie formowania puszki przekazywana jest do kolejnego urządzenia gdzie obcinana jest nierówna górna krawędź puszek i nadawana jest jej precyzyjnie określona wysokość. Puszka powstała w tych etapach charakteryzuje się większą grubością ścianki w górnej jej części niż grubość reszty jej pobocznic: $(t_{11}=t_{12}=t_{13})>t_{14}$ na Rys. 6.1 a). Górny obszar puszek zwany jest ścianką grubą i jest to fragment ścianki o stałej grubości $t_{11}=t_{12}=t_{13}$ (Rys. 6.1 a)). Celowo uzyskana, większa grubość w górnej jej części jest konieczna ze względu na następujący w końcowym etapie produkcji proces zawężania i krawędziowania. Zwiększona grubość ścianki puszek przyczynia się do zwiększenia stabilności procesu zawężania oraz przeciwdziała pękaniu krawędzi puszek podczas etapu formowania kołnierza puszek. Jednym z efektów mających miejsce podczas procesu zawężania puszek jest efekt przyrostu grubości ścianki w odkształcanym obszarze. Podczas zawężania górnej, grubszej ścianki puszek następuje stopniowy wzrost grubości ścianki, który zależny jest od stopnia redukcji średnicy puszek. Im bardziej średnica puszek zostaje zmniejszona, tym większy przyrost grubości ścianki następuje: $t_{31}<t_{32}<t_{33}$ (Rys. 6.1 b)). Jak wspomniano wcześniej, większa grubość ścianki puszek w górnej jej części wynika z ograniczeń technologii produkcji oraz procesu zawężania jak również aspektów wytrzymałościowych, jednak w pewnych obszarach szyjki oraz kołnierza puszek tak duży przyrost grubości nie jest wymagany.



Rys. 6.1 Górna część puszkii przed procesem zawężania a) oraz po procesie zawężania b)

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie szczegółowej analizy technologii produkcji aluminiowej puszkii napojowej, w tym przeprowadzenie testów jakościowych, badanie zależności między parametrami geometrycznymi puszkii, a wytrzymałością oraz cechami funkcjonalnymi. Ponadto, analiza stanu wiedzy na temat modelowania numerycznego procesu formowania aluminiowej puszkii napojowej oraz opracowanie modelu tego procesu. Jak również dostarczenie wiedzy umożliwiającej doskonalenie procesu produkcji i polepszenie jakości wyrobów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy postawiono poniższą tezę pracy:

Analiza i modelowanie procesu produkcji aluminiowej puszkii napojowej ze stopu aluminium 3104 w stanie umocnienia H19 zrozumienie wpływu parametrów procesu na wytrzymałość i cechy funkcjonalne puszkii oraz pozwala na doskonalenie jakości i efektywności produkcji. W szczególności, że zmiana rozkładu grubości ścianki puszkii w obszarze jej szyjki oraz kołnierza nie spowoduje spadku wytrzymałości aluminiowej puszkii napojowej, a uzyskanie zmiennej grubości ścianki grubej w niezawężonej puszcze, jest możliwe przez zastosowanie stempla o nowym kształcie, co w efekcie przyniesie obniżenie wagi pojedynczej puszkii i zmniejszy zużycie materiału potrzebnego do jej wyprodukowania.

Celem szczegółowym pracy jest opracowanie oraz przetestowanie w warunkach produkcyjnych, technologii formowania puszki o stałej grubości ścianki w obszarze jej szyjki oraz kołnierza, za pomocą nowego stempla tłoczącego o kształcie umożliwiającym otrzymanie takiego efektu. Zrealizowanie tego celu zostanie osiągnięte przy pomocy stworzonego modelu numerycznego procesu formowania aluminiowej puszki napojowej.

Osiągnięcie zamierzonego celu oraz udowodnienie postawionej tezy, postanowiono zrealizować poprzez realizację następujących zadań:

1. Opracowanie krzywej umocnienia stopu aluminium 3104-H19 dla odkształceń ponad 200%;
 - a. Przygotowanie wstępnych symulacji procesu formowania aluminiowej puszki napojowej;
2. Badania plastometryczne materiału puszki po głównych etapach formowania korpusu puszki;
3. Implementacja oraz walidacja stworzonej krzywej umocnienia;
4. Badanie wpływu temperatury występującej w procesie produkcyjnym aluminiowej puszki napojowej oraz warstwy lakieru nanoszonego na wewnętrzną część puszki na wytrzymałość puszki;
5. Testy jednoosiowego rozciągania próbek materiału wyciętego z pobocznic puszki po etapach ekspozycji na podwyższoną temperaturę;
6. Testy jakościowe aluminiowej puszki napojowej po kolejnych etapach produkcyjnych;
7. Badanie lakieru wewnętrznego aluminiowej puszki napojowej w teście ściskania jednoosiowego;
8. Symulacje numeryczne testów jakościowych puszki: ściskanie osiowe (Axial Load Force - ALF), ciśnienie wybrzuszenia denka (Dome Reversal Pressure - DRP);
9. Przygotowanie modelu numerycznego procesu zawężania aluminiowej puszki napojowej ;
10. Symulacje procesu zawężania aluminiowej puszki napojowej;
11. Analiza rozkładu grubości ścianki aluminiowej puszki napojowej w obszarze jej szyjki oraz kołnierza;
12. Przeprowadzenie symulacji tłoczenia aluminiowej puszki napojowej z wykorzystaniem stempla o nowym kształcie;
13. Symulacje procesu zawężania puszki z nowym rozkładem grubości ścianki grubej;

14. Przygotowanie prototypowego stempla tłoczącego;
15. Przeprowadzenie testów nowego stempla tłoczącego;
16. Pomiary profilu grubości ścianki puszki wytłoczonej za pomocą nowego stempla;
17. Porównanie otrzymanych wyników symulacji z pomiarami ścianki puszek wykonanych za pomocą nowego stempla.

7 Opracowanie krzywej umocnienia materiału

Pierwsza dwuczęściowa puszka napojowa wytworzona w technologii DWI, czyli tłoczenia z wyciąganiem została wyprodukowana w 1963 roku. Wiele procesów przeróbki plastycznej metali, jak również ten dotyczący produkcji aluminiowej puszki napojowej, próbuje się odtworzyć za pomocą symulacji numerycznych. Symulacje numeryczne mogą być pomocne w zrozumieniu procesu produkcyjnego jak również optymalizacji jego istotnych parametrów, takich jak: współczynnik umocnienia krzywej materiału [14], współczynnik tarcia w procesie ciągnięcia [44], siła oraz naprężenia w procesie pocieniania korpusu puszki [25], grubość kubka po procesie tłoczenia [45], redukcja zużycia materiału [46], modyfikacja geometrii denka puszki w celu zwiększenia wytrzymałości puszki na ciśnienie [47], albo do opracowania nowego kształtu narzędzi tłoczących [48]. Aby wyniki symulacji numerycznych poprawnie odzwierciedlały rzeczywistość, należy przede wszystkim jak najprecyzyjniej zdefiniować numeryczny model materiału. Definicja modelu materiałowego powinna uwzględniać takie parametry jak: temperatura, odkształcenie, prędkość odkształcenia, odpowiednio do procesu, który ma być przedmiotem symulacji numerycznych. Praca [49], opisuje tworzenie modelu numerycznego procesu produkcji aluminiowej puszki napojowej, lecz autorzy wspomnianej pracy zmuszeni byli użyć w symulacji innego modelu materiałowego, ponieważ model dla stopu aluminium 3104 H19 nie był jeszcze opracowany. Jest wiele prac w których krzywa umocnienia dla tego stopu aluminium określona jest do poziomu odkształceń wynoszących 0,02 [50], lub jak w przypadku pracy [51] do 0,3, co jest stanowczo poniżej poziomu odkształceń występujących w procesie formowania aluminiowej puszki napojowej. Puszki napojowej produkowane są najczęściej z blachy aluminiowej o grubości 240-250 μm , a grubość ścianki puszki po procesie formowania osiąga wartości rzędu 90 μm . Z prostych obliczeń wynika, że poziom odkształceń wynikający z zmiany grubości materiały wynosi około 1,5. W pracy [52] przedstawiono pierwszy etap formowania puszki napojowej, czyli tłoczenie kubka. Jak wykazała analiza numeryczna, poziom odkształceń w kubku wynosi 0,6, a krzywa umocnienia materiału otrzymana w wyniku badań eksperymentalnych pokrywała zakres odkształceń tylko do wartości 0,1. Równanie opisujące krzywą umocnienia stopu aluminium 3104 H19 jest przedstawione przez autorów w pracy [53]. Niestety autorzy nie wspominają o badaniach i sposobie uzyskania parametrów równania więc nie wiadomo dla jakiego poziomu odkształceń została opracowana krzywa umocnienia. Analiza numeryczna całego procesu formowania aluminiowej puszki napojowej

została przedstawiona w pracy [54], jednak autorzy nie podali informacji o krzywej umocnienia zaimplementowanej w modelu numerycznym.

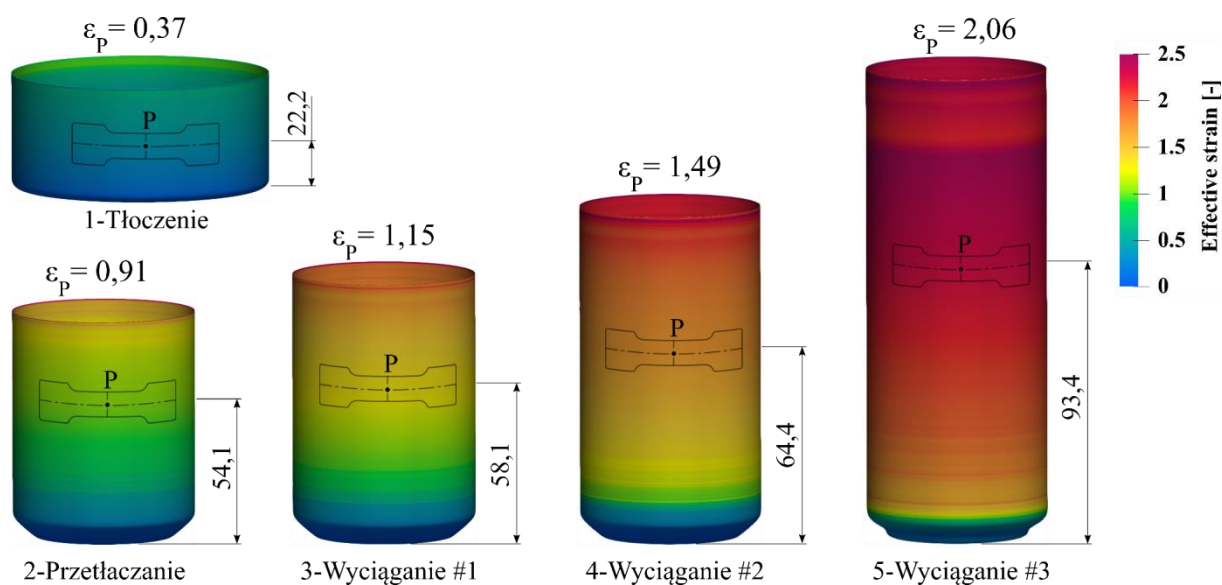
Analiza literatury wskazuje, że brakuje modelu krzywej umocnienia dla stopu aluminium 3104 H19 w zakresie odkształceń występujących w procesie formowania aluminiowej puszki napojowej. Prezentowane modele opierają się na wynikach testów jednoosiowego rozciągania i ekstrapolacji tych danych. Takie modele mogą dokładnie opisywać zachowanie materiału dla małych odkształceń plastycznych. Przy większych odkształceniach, takich jak te występujące w procesie produkcyjnym aluminiowej puszki napojowej, modele te mogą być niewystarczające do precyzyjnego odzwierciedlenia zachowania materiału.

Istnieje możliwość opracowania krzywej umocnienia materiału wykorzystywanego do produkcji puszek napojowych, jednak taki proces wymaga badania próbek pobieranych z różnych etapów procesu formowania. Niestety, standardowe próbki o rozmiarach zgodnych z normą PN-EN 10002-1+AC1, nie nadają się do tego celu. Na szczęście, dostępna literatura naukowa wskazuje na możliwość przygotowania mniejszych próbek, które można wykorzystać do badań jednoosiowego rozciągania i które są bardziej odpowiednie do analizy zachowania materiału w procesie formowania puszek napojowych. Wyniki badań opisane w pracy [55] wskazują, że zminiaturyzowane próbki mogą zostać użyte, w sytuacjach kiedy zastosowanie próbek o standardowych wymiarach jest niemożliwe. Farrukh i inni [56] wykazali, że zachowanie próbek zminiaturyzowanych jest porównywalne z zachowaniem próbek standardowych. Zostało to także potwierdzone przez autorów pracy [57]. Dodatkowo, trzy rodzaje zminiaturyzowanych próbek zostały przetestowane przez Bergonzi, Vettori i Pirondi [58], wykazali oni, że poziom naprężeń otrzymywany dla różnych kształtów próbek jest porównywalny. Jak wynika z powyższej analizy, zastosowanie mniejszych próbek do badań jednoosiowego rozciągania jest możliwe pod warunkiem, że otrzymane wyniki zostaną zweryfikowane poprzez porównanie z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu próbek standardowych.

W kolejnych rozdziałach została opisana procedura tworzenia krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 H19 w postaci blachy o grubości 240 μm , dla poziomych odkształceń materiału występujących w procesie produkcyjnym aluminiowej puszki napojowej.

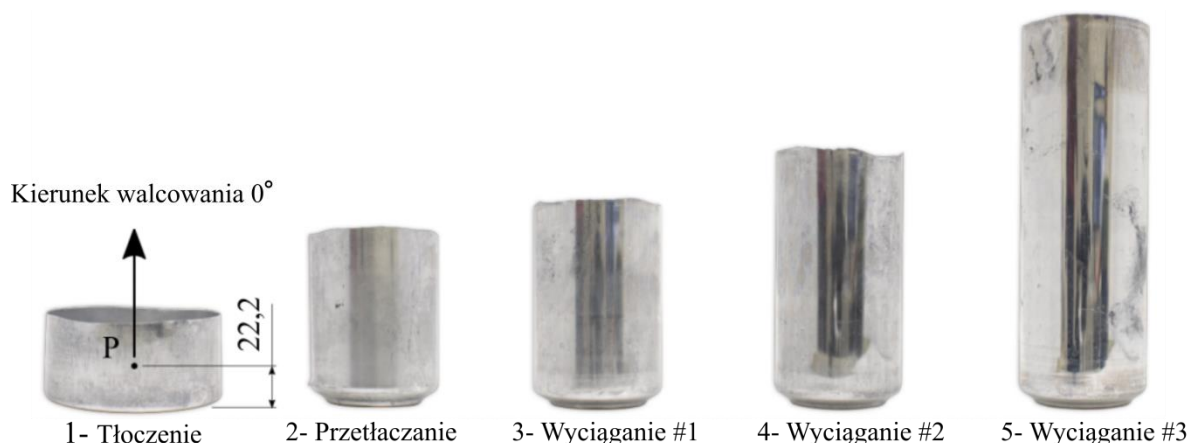
7.1 Opracowanie modelu sprężysto-plastycznego stopu 3104 H19

Opracowanie krzywej umocnienia dla stopu aluminium 3104 H19 w postaci taśm o grubości 240 μm , zostało wykonane dzięki wstępnym symulacjom numerycznym procesu formowania aluminiowej puszki napojowej. Przeprowadzenie wstępnych symulacji numerycznych pozwoliło obrać na pobocznicę pewien punkt referencyjny, oznaczony literą P oraz śledzenie jego przemieszczenia w trakcie procesu formowania puszki. Dodatkowo, symulacje dostarczyły informacji na temat poziomu odkształceń plastycznych występujących w tym punkcie w różnych etapach formowania puszki (Rys. 7.1).



Rys. 7.1 Mapa rozkładu odkształceń dla pierwszych pięciu etapów formowania aluminiowej puszki napojowej, uzyskanych przy zastosowaniu istniejącej krzywej umocnienia materiału

Obrany punkt P posłużył do wyznaczenia miejsca pobrania próbek do badań plastometrycznych. Pozycja kątowa punktu P na pobocznicę formowanej puszki została zdefiniowana w taki sposób, aby pokrywała się z miejscem, w którym widoczne na pobocznicę linie walcowania są równoległe do osi puszki. Oznaczenie pozycji kątowej punktu P na pobocznicę wytłoczek z których powstaje puszka, było możliwe ponieważ linie walcowania pochodzące z procesu powstawania blachy aluminiowej są cały czas widoczne na denku puszki. Przyjęta odległość punktu P od podstawy tzw. kubka, który powstaje po pierwszym etapie formowania, wynosiła 22,2 mm (Rys. 7.2). Odległość ta została dobrana w taki sposób aby było możliwe wycięcie zminiaturyzowanych próbek z każdego etapu formowania puszki.

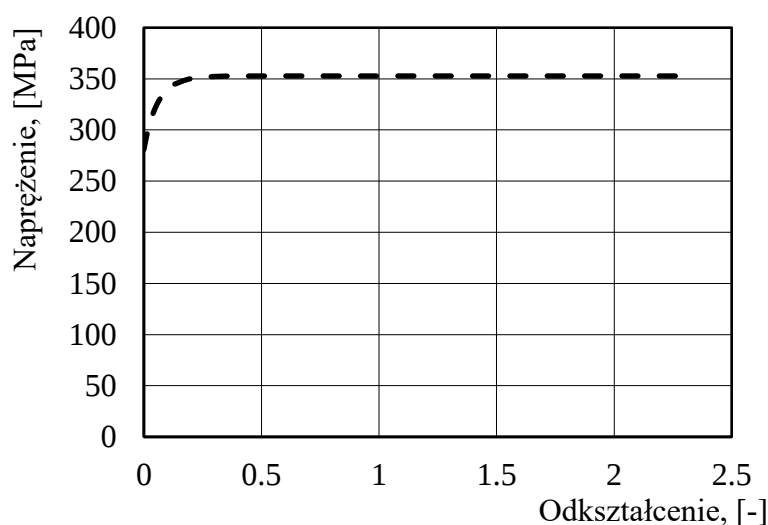


Rys. 7.2 Pięć pierwszych etapów formowania aluminiowej puszki napojowej

Na potrzeby wstępnych symulacji numerycznych procesu formowania aluminiowej puszki napojowej został przyjęty uproszczony model krzywej umocnienia materiału, opisany równaniem Hocket-Sherby'ego, (7.1) którego parametry zostały dostarczone przez jednego z dostawców taśm aluminiowych do produkcji puszek:

$$\sigma = B - (B - A) * \exp(-C\varepsilon^n) \quad (7.1)$$

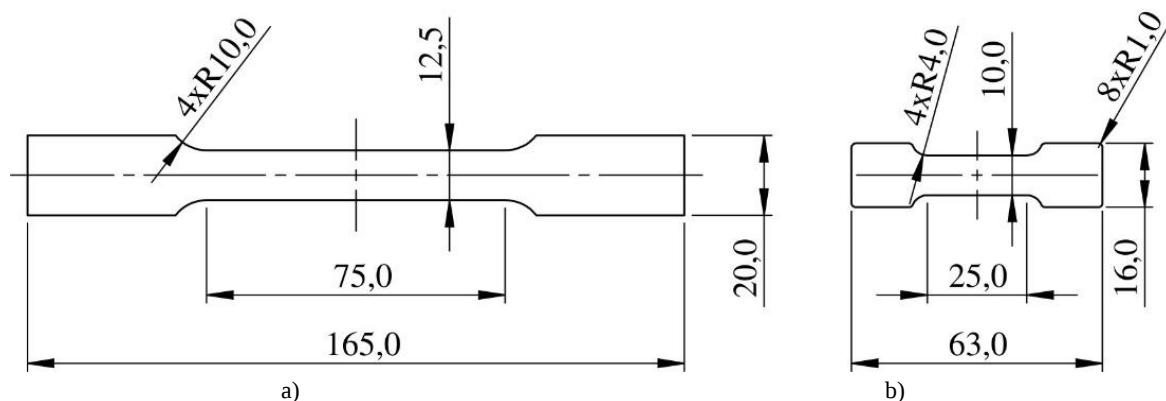
gdzie: ε – odkształcenie; $A=281,25$; $B=351,9$; $C = 14,99$; $n = 0,9691$. Na Rys. 7.3 poniżej, przedstawiona została krzywa umocnienia opisana tym równaniem. Jak można wywnioskować z wykresu, model ten nie przewiduje poprawnie umocnienia materiału dla dużego poziomu odkształceń.



Rys. 7.3 Model (Hocket-Sherby) krzywej umocnienia dla stopu aluminium 3104 H19 wykorzystany w pierwszym modelu numerycznym procesu formowania aluminiowej puszki napojowej

7.2 Opracowanie zminiaturyzowanych próbek do testów jednoosiowego rozciągania

Dla stopu aluminium 3104 H19 w postaci blachy o grubości 0,090-0,240 mm charakterystykę materiału dla dużych odkształceń, można jedynie uzyskać podczas testów jednoosiowego rozciągania. Kolejnym wyzwaniem, które pojawiło się na etapie przygotowywań do badań eksperymentalnych był rozmiar standardowej próbki wykorzystywanej w tego typu testach. Uniemożliwiał on przygotowanie do badań materiału z poboczniczy puszki, dlatego zdecydowano się na zmniejszenie rozmiaru próbki do rozmiarów przedstawionych na Rys. 7.4 b).



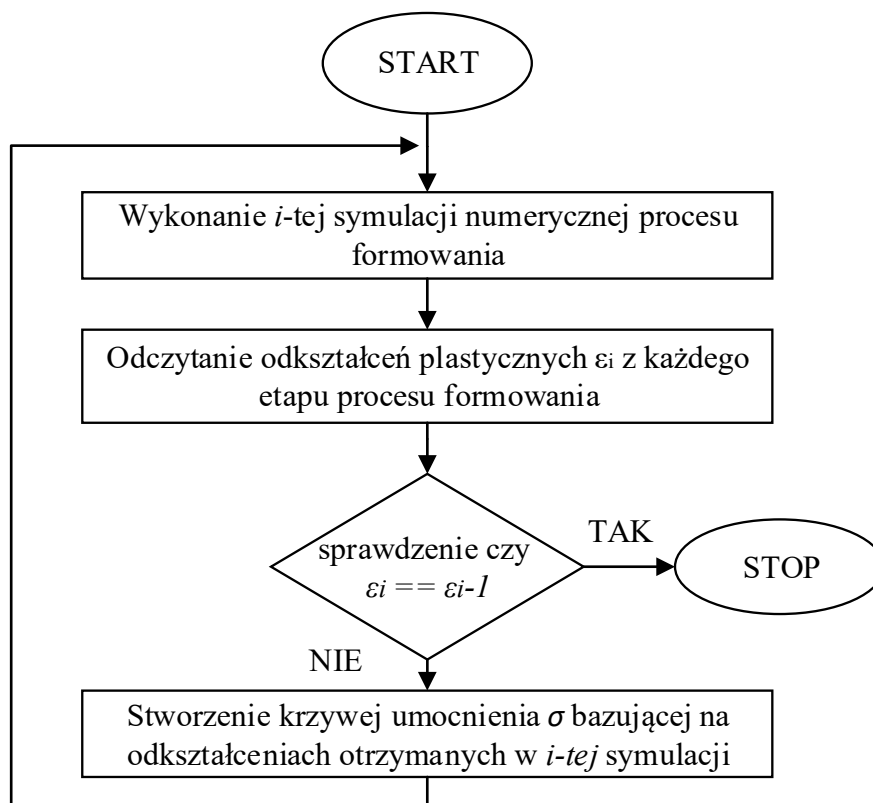
Rys. 7.4 Próbkki do badań plastometrycznych a) próbka standardowa b) próbka zminiaturyzowana

7.3 Kalibracja krzywej umocnienia

Ze względu na wysoką wartość odkształceń plastycznych w procesie formowania puszki, nie było możliwe wykorzystanie standardowej metody odwrotnej takiej jak w pracy [59]. Do opracowania krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 H19 zaproponowano algorytm opisany poniżej. Pierwszym etapem opracowania krzywej umocnienia były wstępne analizy numeryczne, których wyniki zostały przedstawione na Rys. 7.1. Symulacje numeryczne umożliwiły śledzenie wybranego punktu P na każdym etapie formowania korpusu puszki. Następnie, w tych punktach zostały wycięte próbki do badań plastometrycznych.

Na podstawie wyników rozciągania jednoosiowego próbek z poszczególnych etapów formowania oraz wartości odkształceń plastycznych z symulacji numerycznych, stworzona została krzywa umocnienia dla zakresu odkształceń od 0-2.0. Kolejnym krokiem było zaimplementowanie stworzonej krzywej umocnienia do modelu numerycznego procesu

formowania, ponowne uruchomienie obliczeń oraz korekta wartości odkształceń w punkcie P na każdym etapie formowania. Schemat kalibracji krzywej umocnienia został przedstawiony na Rys. 7.5 poniżej.



Rys. 7.5 Schemat algorytmu kalibracji parametrów opracowywanej krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 H19

7.4 Wyniki badań eksperymentalnych

Badania jednoosiowego rozciągania próbek stopu 3104 H19 zostały przeprowadzone na maszynie Zwick Z250, w temperaturze pokojowej, z prędkością odkształcenia $0,005 \text{ s}^{-1}$. Wszystkie próbki były testowane do zniszczenia.

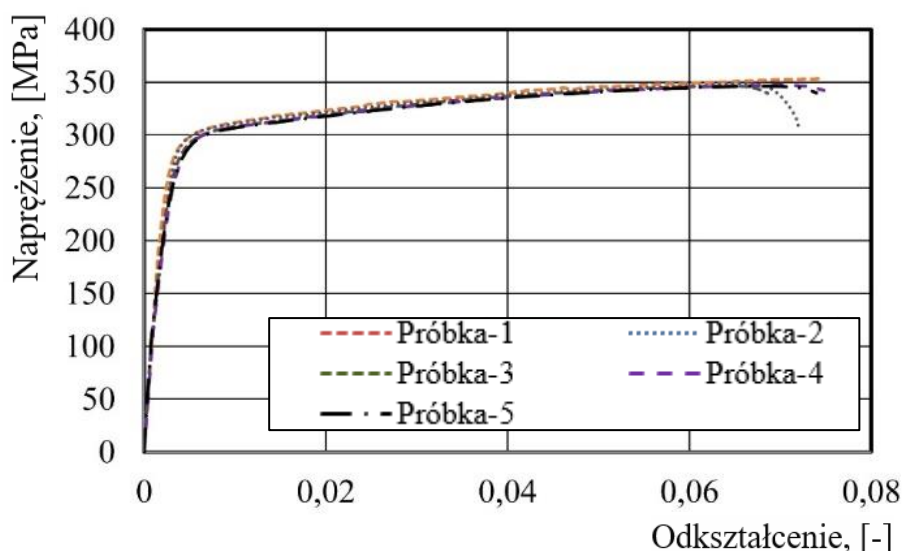
Pierwszy etap badań polegał na sprawdzeniu poprawności otrzymywanych wyników testu jednoosiowego rozciągania dla zminiaturyzowanej próbki (Rys. 7.3 b). Badania zostały przeprowadzone dla próbek zminiaturyzowanych oraz standardowych wyciętych z blachy wsadowej do produkcji puszki aluminiowej o grubości $240 \text{ }\mu\text{m}$. Wyniki przeprowadzonych prób zostały zebrane w Tabeli 7.1. Analiza wyników testów jednoosiowego rozciągania wykazała, że krzywe umocnienia materiału wsadowego dla próbek zminiaturyzowanych oraz standardowych praktycznie się pokrywają. Odchylenie standardowe dla wyników z dwóch różnych próbek wynosi $0,64 \text{ MPa}$ dla $R_{0,2}$ oraz 3 MPa dla R_m . Do pomiaru odkształceń

wzdłużnych podczas testu jednoosiowego rozciągania został zastosowany mechaniczny ekstensometr. Przedstawione w Tabeli 7.1 dane potwierdzają poprawność otrzymywanych parametrów mechanicznych dla próbki zminiaturyzowanej. Przeprowadzone testy oraz analiza porównawcza wyników dla dwóch rozmiarów próbek pozwoliły potwierdzić poprawność działania opracowanej metodyki, opartej o wykorzystanie próbek zminiaturyzowanych, wykorzystanych w dalszej części badań. Na Rys. 7.6 przedstawione są krzywe umocnienia uzyskane podczas testów próbki zminiaturyzowanej.

Tabela 7.1 Wyniki badań plastometrycznych dla próbki standardowej oraz zminiaturyzowanej

Typ próbki	a0(mm)	b0(mm)	S0(mm ²)	Rp _{0,2} (MPa)	Rm(MPa)	A(%)
Standardowa	0.24	12.50	3.00	286.74 ± 1.53	315.31 ± 1.22	4.92 ± 0.39
Zminiaturyzowana	0.24	10.00	2.40	286.10 ± 1.14	318.33 ± 0.41	6.10 ± 0.48

Gdzie: a0 - grubość początkowa próbki, b0 – szerokość początkowa próbki, S0- początkowe, poprzeczne pole przekroju próbki



Rys. 7.6 Krzywe umocnienia stopu aluminium 3104 H19 dla testu przy wykorzystaniu zminiaturyzowanych próbek

Do opisu tworzonej krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 H19 posłużyło równanie Hansla-Spittel'a [60]. Równanie Hansla-Spittel'a, zostało wybrane z dwóch powodów. Po pierwsze, jest ono powszechnie wykorzystywane do charakterystyki umocnienia materiału w modelach plastycznej przeróbki metali. Z tego względu równanie to może być wykorzystane w wielu komercyjnych programach MES, jak na przykład QForm lub Forge3. Po drugie, równanie Hansla-Spittel'a zawiera odpowiednią ilość współczynników do aproksymacji potencjalnie bardziej złożonych krzywych naprężenie-odkształcenie niż ta przedstawiona na Rys. 7.3.

Dla przyjętych warunków izotermicznych panujących w trakcie głównych etapów formowania korpusu puszki (proces przetłaczania oraz wyciągania ścianki puszki odbywa się w kąpeli chłodząco-smarującej o kontrolowanej temperaturze w zakresie 40-45°C) oraz braku znacznej czułości tego stopu na prędkość odkształcenia, równanie Hansla-Spietzel'a mogło zostać uproszczone do postaci:

$$\sigma = A\varepsilon^{m_1} \exp\left(\frac{m_2}{\varepsilon}\right) (1 + \varepsilon)^{m_3} \exp(m_4\varepsilon) \quad (7.2)$$

gdzie: A , $m_1 - m_4$ – wartości empiryczne.

Testy jednoosiowego rozciągania, próbek wyciętych z poszczególnych etapów formowania aluminiowej puszki napojowej zostały przeprowadzone minimum 2 razy. Jeżeli w wynikach pojawiła się rozbieżność pomiędzy wartościami $R_{0,2}$ i R_m większa niż 2%, wtedy wykonywano dodatkowy test. Uśrednione wyniki, wraz z odchyleniem standardowym zostały zebrane i przedstawione w Tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Uśrednione wyniki wraz z odchyleniem standardowym dla prób jednoosiowego rozciągania materiału puszki na poszczególnych etapach formowania

Etap formowania	a0 (mm)	b0 (mm)	Rp _{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
1- tłoczenie	0.245 ± 0.001	10.01 ± 0.01	293.65 ± 1.48	328.10 ± 0.84	2.46 ± 0.08
2 - przetłaczanie	0.239 ± 0.002	10.01 ± 0.01	290.15 ± 1.20	325.95 ± 1.20	1.52 ± 0.68
3 - wyciąganie #1	0.206 ± 0.001	9.98 ± 0.03	301.20 ± 7.25	330.97 ± 0.40	1.41 ± 0.40
4 - wyciąganie #2	0.158 ± 0.001	9.92 ± 0.01	320.70 ± 0.28	351.00 ± 0.85	0.92 ± 0.11
5 - wyciąganie #3	0.099 ± 0.001	9.86 ± 0.05	345.80 ± 3.68	374.05 ± 3.75	0.72 ± 0.17

Gdzie: a0 - grubość początkowa próbki, b0 – szerokość początkowa próbki

Wyniki badań plastometrycznych dla prób z poszczególnych etapów formowania puszki, zostały przesunięte na osi odkształceń zgodnie z wartościami otrzymanymi w obliczeniach numerycznych Rys. 7.1. Parametry równania dla nowej krzywej umocnienia (7.2) zostały aproksymowane z danych eksperymentalnych (Rys. 7.6 i Tabela 7.2) z minimalizacją funkcji celu δ :

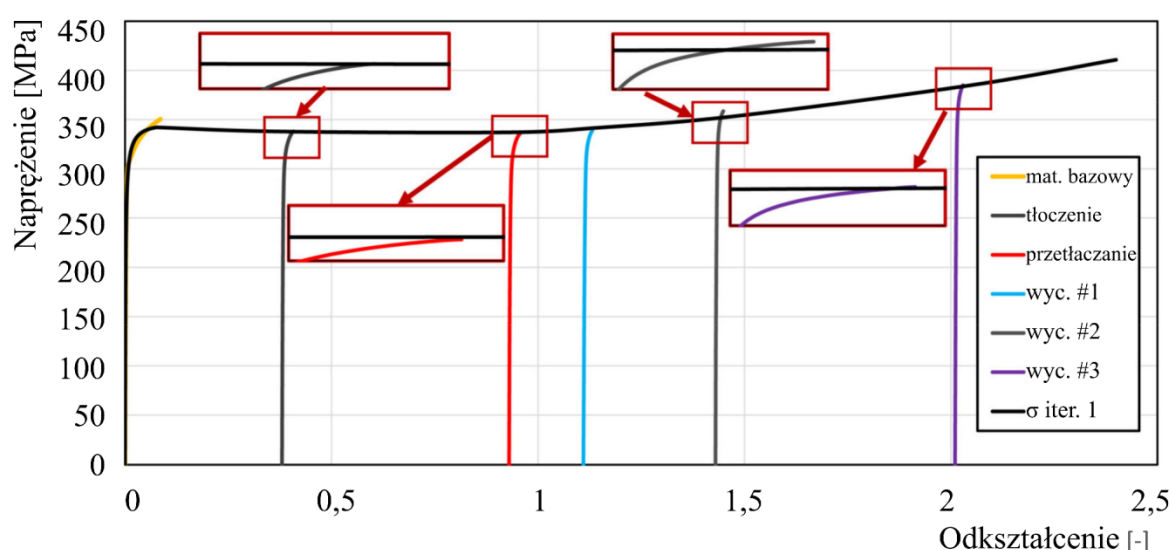
$$\delta = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (\sigma_{ij}^{calc} - \sigma_{ij}^{exper})^2 \rightarrow \min \quad (7.3)$$

gdzie: σ_{ij}^{calc} - napężenie obliczone za pomocą wzoru (7.2), σ_{ij}^{exper} - wartość napężenia zmierzona w próbce jednoosiowego rozciągania, m – liczba próbek z danego etapu tłoczenia, n – liczba wszystkich testów.

Do aproksymacji nowej krzywej umocnienia materiału wykorzystano całą krzywą z testu materiału wsadowego oraz wartości R_m dla pozostałych testów wraz z wartościami odkształceń dla poszczególnych etapów formowania puszki. Uzyskane empiryczne parametry równania (7.2) zostały przedstawione w Tabeli 7.3, a nowa krzywa umocnienia przedstawiona jest na Rys. 7.7

Tabela 7.3 Parametry równania (7.2) dla pierwszej pętli algorytmu przedstawionego na Rys. 7.5

A	m_1	m_2	m_3	m_4
377.524	0,024674	-0,00088	-0,73833	0,4027



Rys. 7.7 Aproksymacja wyników badań plastometrycznych dla pierwszej iteracji algorytmu Rys. 7.5

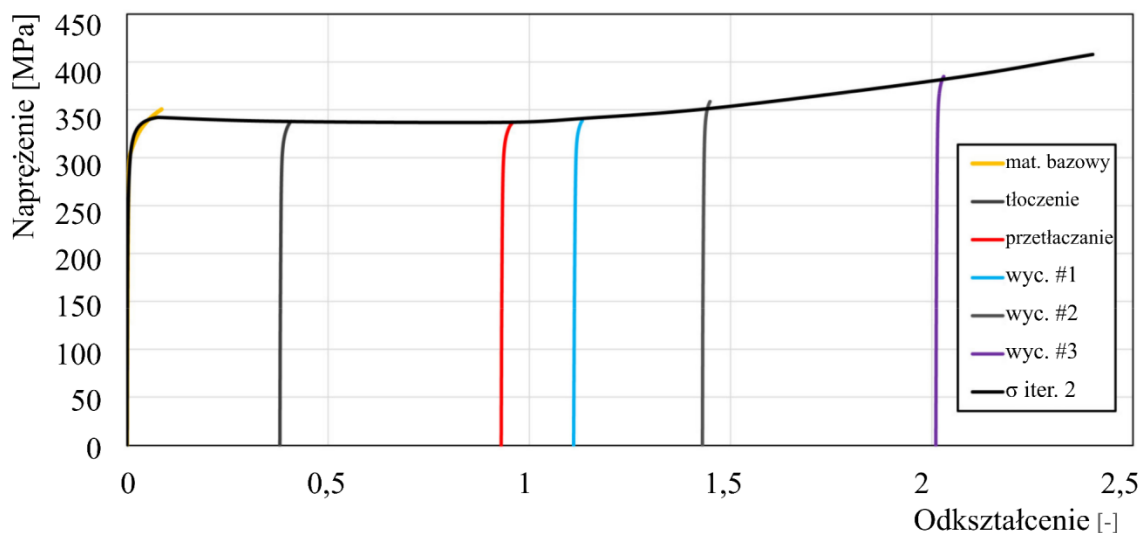
Nowy model krzywej umocnienia został wykorzystany w powtórnie przeprowadzonych symulacjach numerycznych procesu formowania aluminiowej puszki napojowej. Uzyskane w symulacjach numerycznych wartości odkształceń plastycznych w punkcie P na poszczególnych etapach formowania puszki wyniosły odpowiednio: tłoczenie – 0,384; przetłaczanie – 0,939; wyciąganie #1 – 1,139; wyciąganie #2 – 1,482; wyciąganie #3 – 2,052. Porównując otrzymane wyniki odkształceń z wynikami przedstawionymi na Rys. 7.1 można zauważyć, że otrzymane wartości różnią się, w szczególności dla etapów wyciągania #2 – 1,43 oraz wyciągania #3 – 2,01. W związku z powyższym, konieczne było przeprowadzenie kolejnej iteracji algorytmu kalibrującego.

Po każdej iteracji, położenie krzywych umocnienia z poszczególnych etapów formowania było korygowane zgodnie z otrzymywanymi w symulacjach numerycznych wartościami odkształceń. Po korekcji wartości odkształceń przeprowadzano powtórnie aproksymacje

danych eksperymentalnych. Wartości otrzymane podczas drugiej aproksymacji danych eksperymentalnych zostały przedstawione w Tabeli 7.4 oraz na Rys. 7.8.

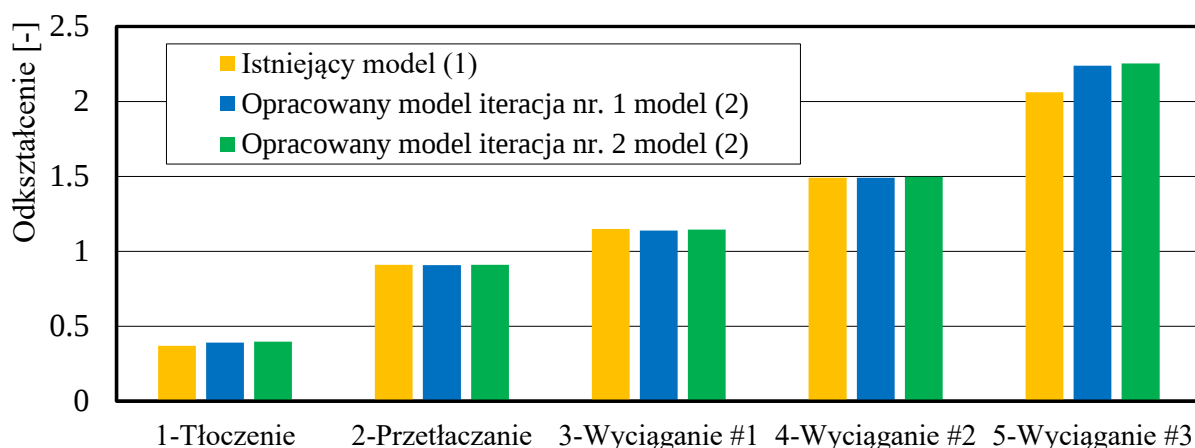
Tabela 7.4 Parametry równania (7.2) dla drugiej iteracji algorytmu przedstawionego na Rys. 8 5

A	m₁	m₂	m₃	m₄
376.974	0.02430	-0.000879	-0.7217	0.3921

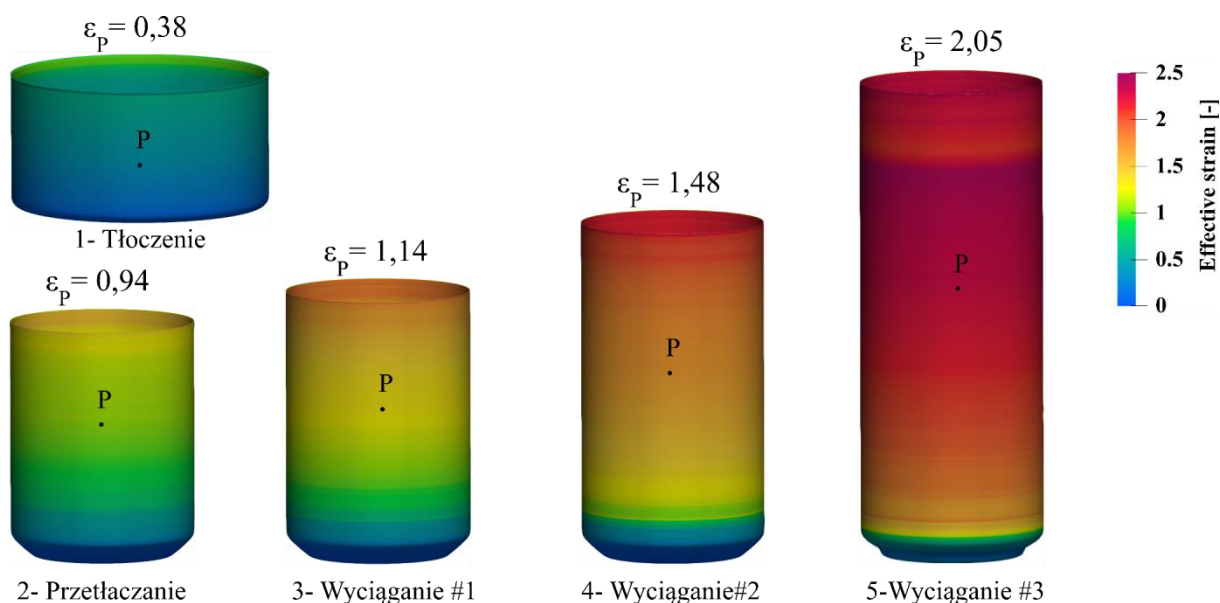


Rys. 7.8 Aproksymacja wyników badań plastometrycznych dla drugiej iteracji algorytmu

Następnym krokiem były kolejne symulacje numeryczne z krzywą umocnienia (7.2) o parametrach takich jak w Tabeli 7.4. Na Rys. 7.9 przedstawione zostały wartości odkształceń po poszczególnych etapach formowania oraz jak zmieniały się te wartości dla każdej iteracji opracowywania nowej krzywej umocnienia. Jak można zauważyć, dla pierwszej i drugiej iteracji wartości odkształceń są praktycznie takie same, co wskazuje również na szybkie osiągnięcie zbieżności dla zaproponowanego algorytmu. Na Rys. 7.10 został przedstawiony rozkład odkształceń na korpusie puszek, po każdym etapie formowania uzyskany w modelu numerycznym z nową krzywą umocnienia.

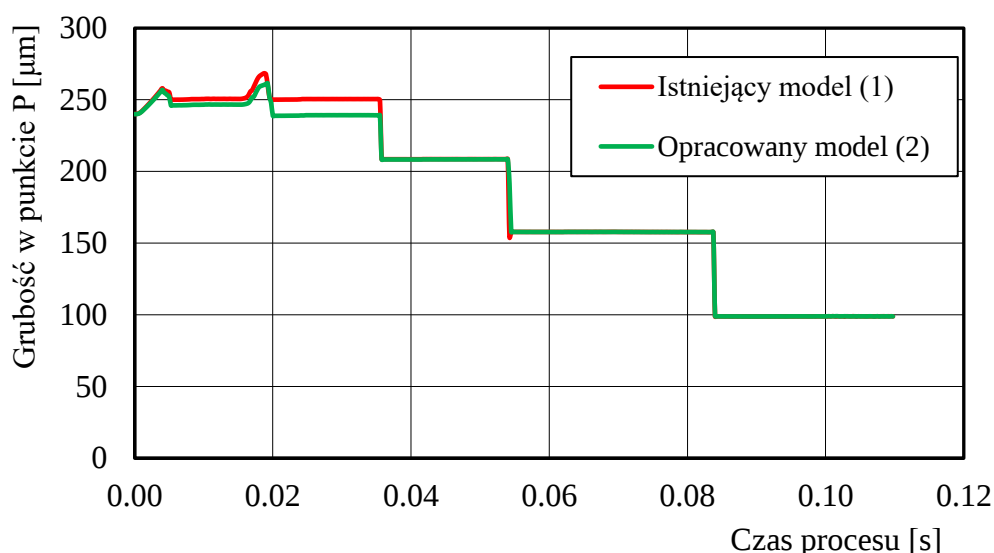


Rys. 7.9 Wyniki odkształceń uzyskanych w obliczeniach numerycznych dla modeli z istniejącą krzywą umocnienia materiału (model 1) oraz opracowaną krzywą umocnienia (model 2)



Rys. 7.10 Mapa rozkładu odkształceń dla pierwszych pięciu etapów formowania aluminiowej puszkii napojowej, uzyskanych przy zastosowaniu opracowanej krzywej umocnienia (7.2) i parametrami z Tabela 7.4

Po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, ich aproksymacji zaproponowanym algorytmem oraz symulacji numerycznych procesu formowania aluminiowej puszkii napojowej z nową krzywą umocnienia, sprawdzono poprawność otrzymywanych wyników numerycznych. W tym celu porównano pomiary grubości w punkcie *P* poboczniczy wytłoczek po każdym etapie formowania z wynikami grubości uzyskanymi w modelu numerycznym. Przedstawione na Rys. 7.11 oraz w Tabela 7.5 dane jasno pokazują, że dzięki nowemu modelowi umocnienia materiału wyniki symulacji w postaci grubości poboczniczy puszkii w punkcie *P* są bardziej zbliżone do wartości zmierzonych, w szczególności dla dwóch pierwszych etapów formowania puszkii.



Rys. 7.11 Porównanie wyników grubości ścianki puszki w punkcie P dla obliczeń numerycznych z wykorzystaniem modelu materiałowego (1) oraz modelu (2)

Tabela 7.5 Porównanie grubości ścianki puszki napojowej w punkcie P otrzymanej w obliczeniach numerycznych z wynikami pomiarów

Model numeryczny oraz pomiary	Grubość ścianki puszki w punkcie P (μm)				
	Etap 1 Tłoczenie	Etap 2 Przetłaczanie	Etap 3 Wyciąganie #1	Etap 4 Wyciąganie #2	Etap 5 Wyciąganie #3
Bieżąca krzywa umocnienia (eq. 1)	250	251	209	158	99
Zaproponowana krzywa umocnienia (eq. 2)	246	239	208	158	99
Średnia grubość zmierzonych próbek	245	239,5	205,7	157,5	98,5

Jak wspomniano we wstępie, formowanie korpusu puszki musi być przeprowadzone w kilku etapach. Etapy te generują w stopie aluminium 3104 H19 znaczny poziom odkształceń plastycznych. Dodatkowo, materiał z którego wykonana jest puszka doznaje obciążeń w różnych kierunkach. Podczas tłoczenia oraz przetłaczania, gdy materiał puszki znajduje się jeszcze pod dociskaczem, poddawany on jest działaniu naprężeń ściskających, co skutkuje zwiększeniem jego grubości. W kolejnym etapie tłoczenia, materiał uwolniony spod dociskacza zaczyna być rozciągany, co z kolei skutkuje zmniejszeniem jego grubości. Takie zmienne obciążenie, objawiające się zmianą grubości tłoczonego materiału, można było zaobserwować podczas tłoczenia oraz przetłaczania także w obranym punkcie *P* (Rys. 7.11). Zaobserwowanym efektem takiego obciążania jest spadek umocnienia odkształcanego materiału, zwany efektem Bauschinger’a. Efekt ten dla stopu aluminium 3104 w stanie umocnienia H19 został zbadany przez Duval, J.L i innych [61]. Inni autorzy [62], badali

występowanie efektu Bauschinger'a podczas formowania przyrostowego stopu aluminium 5754 i wykazywali jego wpływ na formowanie wieloetapowe.

Do zrealizowania założonego celu pracy jakim jest stworzenie nowego stempla tłoczącego przy pomocy modelu MES, dane w postaci precyzyjnej krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 H19 są niezbędne. W przestudiowanej literaturze brakuje informacji na temat krzywej umocnienia stopu 3104 dla tak dużych odkształceń jakie występują w procesie formowania aluminiowej puszki napojowej. Istnieją publikacje na temat modeli numerycznych procesu formowania puszki ale bazują one na charakterystyce materiału do poziomu odkształceń 0,02 [50], 0,1 [51] lub 0,3 [52]. Stosowane we wspomnianych pracach krzywe umocnienia są ekstrapolowane dla dużych odkształceń przez oprogramowanie wykorzystywane przez autorów do obliczeń. Jak widać z przeprowadzonych badań, podejście może być obarczone dużym błędem i nie uchwycić efektów zachodzących w materiale podczas tłoczenia puszki, co mogłoby skutkować błędnymi wynikami symulacji dla nowo opracowywanego narzędzia tłoczącego. Stworzona krzywa umocnienia uwzględnia występujący w materiale podczas tłoczenia oraz przetłaczania efekt Bauschinger'a, jak również dostarcza informacji o zachowaniu materiału dla całego zakresu odkształceń występujących w procesie produkcyjnym aluminiowej puszki napojowej.

8 Wpływ temperatury w procesie produkcyjnym puszki

Aktualna technologia pozwala produkować puszkę napojową ze stopu 3104 H19 blachy o grubości początkowej rzędu 240 μm . Proces produkcyjny zawiera etapy przeróbki plastycznej na zimno, której parametry wpływają na własności początkowe własności materiału i finalnego wyrobu. Na mechaniczne własności gotowej puszki wpływają także takie czynniki jak: parametry formowania [14], mechanizmy umocnienia materiału [63], procesy zużycia narzędzi tłoczących [64], warunki tarcia pomiędzy narzędziami a materiałem [44], odkształcalność formowanego materiału [65].

Oprócz etapów przeróbki plastycznej, na mechaniczne własności gotowej puszki wpływ mają etapy pośrednie, podczas których następuje termiczne oddziaływanie na materiał puszki oraz pokrycie puszki lakierami. W ciągu produkcyjnym między etapami formowania ma miejsce mycie oraz suszenie puszki w specjalnie zaprojektowanej do tego celu urzędzeniu. Pod koniec etapu mycia, puszka jest suszona przez około 1 minutę w temperaturze sięgającej 200°C. Znany jest zarówno z literatury jak i z praktyki produkcyjnej wpływ takiej temperatury na

spadek stopnia umocnienia stopów aluminium [66], co w konsekwencji przekłada się na końcową wytrzymałość puszki.

Kolejnymi etapami obróbki, w których puszka poddana jest działaniu podwyższonej temperatury, są suszenie lakieru wewnętrznego i zewnętrznego. W obu tych etapach, temperatura w której przebywa puszka wynosi około 200°C. Ze względu na specyfikę procesu produkcyjnego oraz „otwartą” konstrukcję urządzeń w których puszka jest suszona, temperatura puszki nie jest stała, a charakterystyka nagrzewania i odparowywania rozpuszczalników z naniesionej na nią warstwy lakierów, zależy od wykorzystywanego lakieru. Dodatkowym, ważnym aspektem nie poruszonym w literaturze, jest bezpośredni wpływ warstwy lakieru na finalne mechaniczne własności puszki.

Jak wynika z wyżej opisanych, pośrednich etapów produkcji puszki, występują w nim temperatury sięgające 200°C. Chociaż puszka spędza w tych temperaturach tylko kilka minut, możliwy jest jej wpływ na przebieg procesu zawężania, który ma miejsce pod koniec procesu technologicznego. Ponadto, występująca w procesie temperatura może mieć wpływ na wartości siły i ciśnienia uzyskiwane w testach ściskania osiowego (ALF) oraz wybrzuszenia denka (DRP) przeprowadzanych w ramach kontroli jakości puszki.

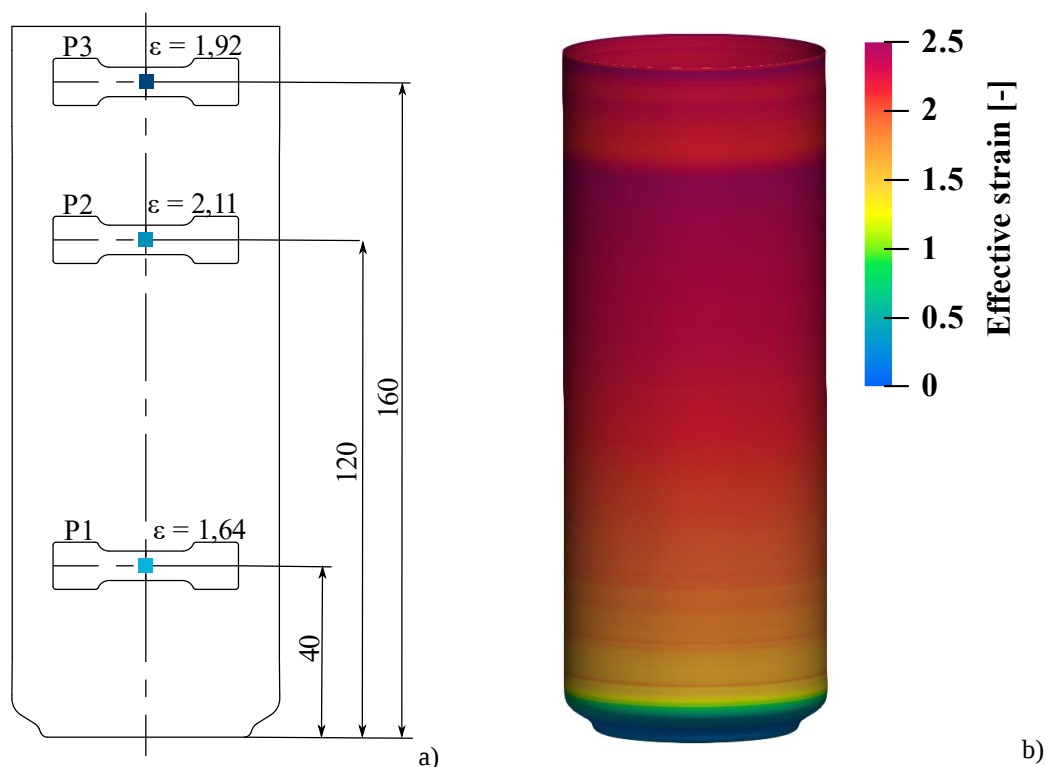
W obecnej literaturze brakuje ilościowych danych o tym, w jakim stopniu opisane wyżej etapy pośrednie na mechaniczne własności gotowej puszki. Dane te są jednak potrzebne zarówno do lepszego zrozumienia procesów odbywających się w materiale puszki, jak i dla rozwiązania praktycznych problemów podczas optymalizacji technologii. Badanie wpływu tych etapów było istotne przy opracowywaniu nowego kształtu stempla tłoczącego, za pomocą którego tworzona jest gruba ścianka puszki. Prosta puszka, z uformowaną ścianką grubą przechodzi przez etapy pośrednie, w których wystawiona jest na działanie podwyższonej temperatury. Dopiero po etapach pośrednich następuje zawężanie puszki w obszarze ścianki grubej. Ponieważ do weryfikacji założeń przyjętych dla kształtu nowego stempla, miał posłużyć model MES procesu produkcji aluminiowej puszki napojowej, musiał on także uwzględniać wpływ występującej w procesie temperatury sięgającej 200°C.

8.1 Testy materiału z pobocznicy puszki

W celu zbadania wpływu temperatury występującej w procesie produkcyjnym puszki na zmianę własności mechanicznych materiału, wykonano serię testów jednoosiowego rozciągania próbek ze stopu 3104 H19. Do tego celu wykorzystano zminiaturyzowaną próbkę (Rys. 7.4b), charakteryzującą się wymiarami pozwalającymi na zbadanie własności w różnych miejscach pobocznicy puszki. Za pomocą takich próbek wykonano również badanie własności blachy wsadowej. Otrzymane wyniki ($R_{p\ 0,2}=286.10 \pm 0.93$ MPa oraz $R_m=318.33 \pm 0.33$ MPa) wykorzystano jako dane referencyjne.

Materiał pobocznicy puszki po formowaniu w prasie pionowej kubka oraz prasie poziomej korpusu puszki charakteryzuje się różnym stopniem umocnienia. Aby uwzględnić wpływ stopnia umocnienia występującego po procesie formowania puszki na spadek własności mechanicznych w skutek wpływu etapów pośrednich produkcji puszki, próbki do badań jednoosiowego rozciągania pobrano z trzech różnych miejsc pobocznicy (Rys. 8.1 a)). Próbki pobrano z puszek po etapach formowania na prasie poziomej, mycia oraz dwóch etapach suszenia. Stopień odkształcenia materiału w miejscach oznaczonych numerami 1, 2 i 3 po procesie formowania w prasie poziomej wynosił odpowiednio: 1,64, 1,92 oraz 2,11. Wartości odkształceń uzyskano dzięki modelom numerycznym procesu formowania puszki (Rys. 8.1 b)). Wpływ temperatury w pośrednich etapach produkcji puszki na zmianę własności mechanicznych materiału, w szczególności w punkcie pomiarowym nr 3 Rys. 8.1 a) ma istotne znaczenie ze względu na późniejszy etap formowania szyjki oraz kołnierza puszki w tym obszarze.

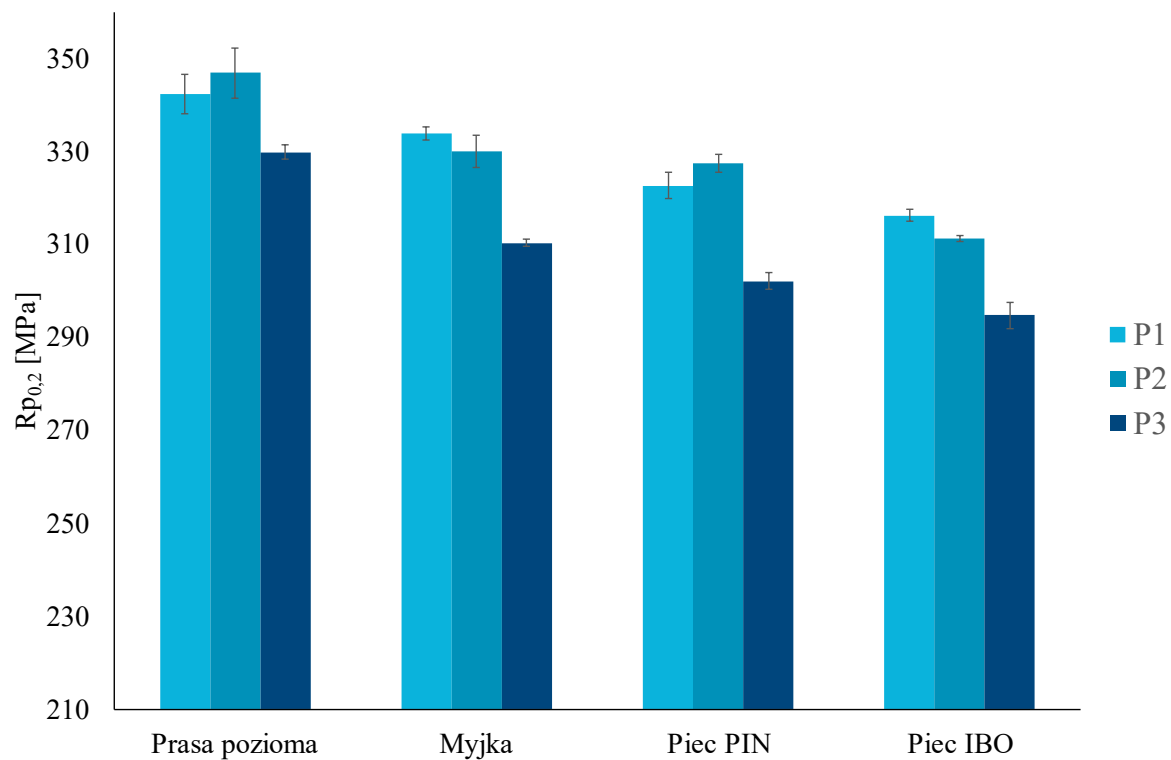
Próbki wycięte z pobocznicy puszki, po etapach w których nanoszone są litografia oraz lakier wewnętrzny były umieszczone w kwasie siarkowym w celu rozpuszczenia naniesionego lakieru. Warstwy lakieru zostały usunięte aby umożliwić pomiar grubości próbek przed testem jednoosiowego rozciągania i wyeliminować wpływ lakieru na wyniki testu.



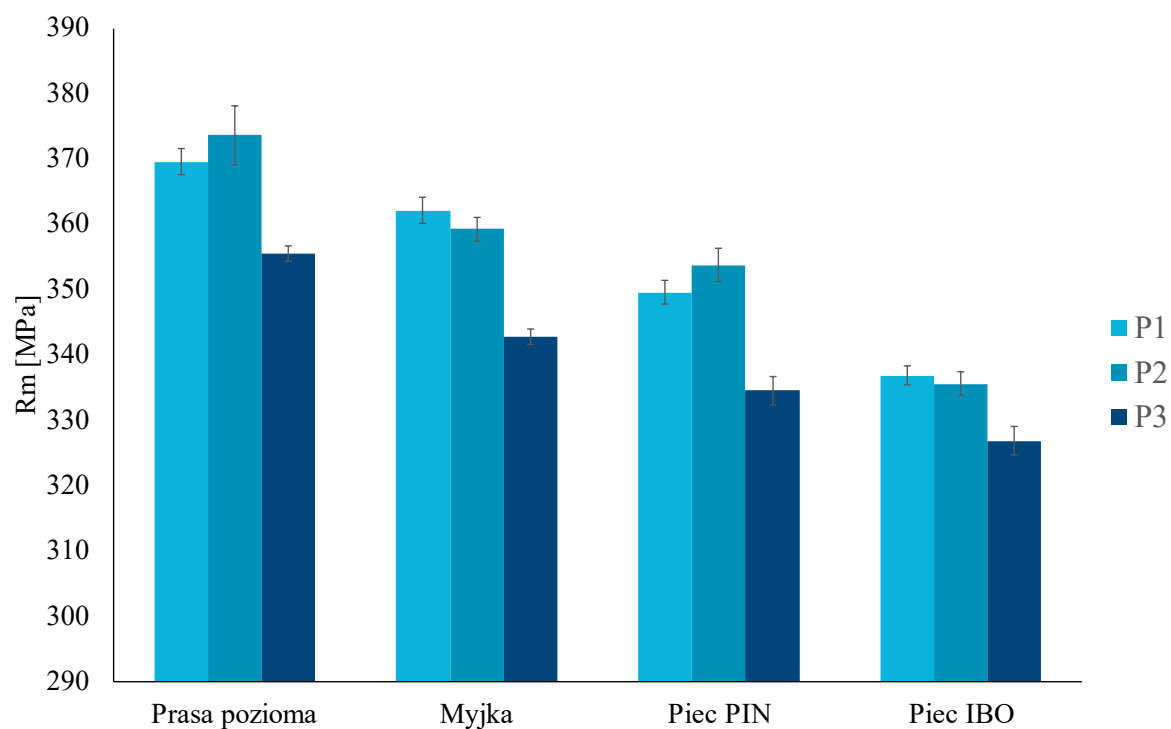
Rys. 8.1 Miejsca pobrania próbek do badań plastometrycznych

Badania jednoosiowego rozciągania przeprowadzono na maszynie Zwick Z250 w temperaturze pokojowej z prędkością odkształcenia wynoszącą 0.005 s^{-1} . Każde badanie zostało powtórzone 2-3 razy. Wyniki badań w postaci wartości umownej granicy plastyczności $R_{p0.2}$ (Rys. 8.2) oraz granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m (Rys. 8.3), wskazują na spadek tych parametrów po procesie mycia (Myjka), suszenia puszki po nałożeniu litografii zewnętrznej (Piec PIN) oraz po utwardzaniu lakieru wewnętrznego (piec IBO). Dla próbek wyciętych w punktach 2 oraz 3, charakteryzujących się wyższym stopniem umocnienia, pochodzącym z wcześniejszego etapu formowania na prasie pionowej oraz prasie poziomej, można zaobserwować większy spadek wartości umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie, niż dla próbki numer 1 o niższym stopniu umocnienia początkowego.

Można zauważyć, że po operacji suszenia puszki w piecu pinowym wartości $R_{p0.2}$ oraz R_m materiału w punkcie 3 przybliżają się do wartości otrzymanych dla blachy wsadowej.



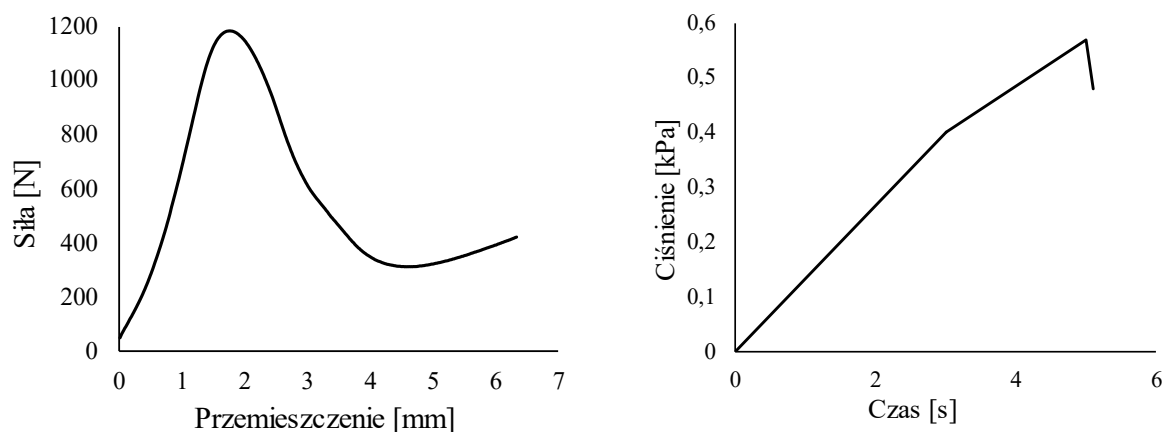
Rys. 8.2 Wyniki umownej granicy plastyczności dla próbek wyciętych z pobocznicy puszk po etapach formowania (Prasa pozioma), mycia (Myjka), suszenia w piecu pinowym (Piec PIN) oraz suszenia w piecu lakieru wewnętrznego (Piec IBO)



Rys. 8.3 Wyniki wytrzymałości na rozciąganie dla próbek wyciętych z pobocznicy puszk po etapach formowania (Prasa pozioma), mycia (Myjka), suszenia w piecu pinowym (Piec PIN) oraz suszenia w piecu lakieru wewnętrznego (Piec IBO)

8.2 Testy jakościowe puszeki

Gotowa aluminiowa puszka napojowa musi spełniać szereg wymagań dotyczących kształtu, jakości litografii oraz parametrów wytrzymałościowych. Aby mieć pewność, że puszka spełnia wszystkie wymagania, poddawana jest wrywkowej kontroli. Dwa testy, które są bardzo istotne, i na które temperatura w procesie produkcyjnym ma wpływ to, nacisk osiowy i ciśnienie wybruszenia denka.



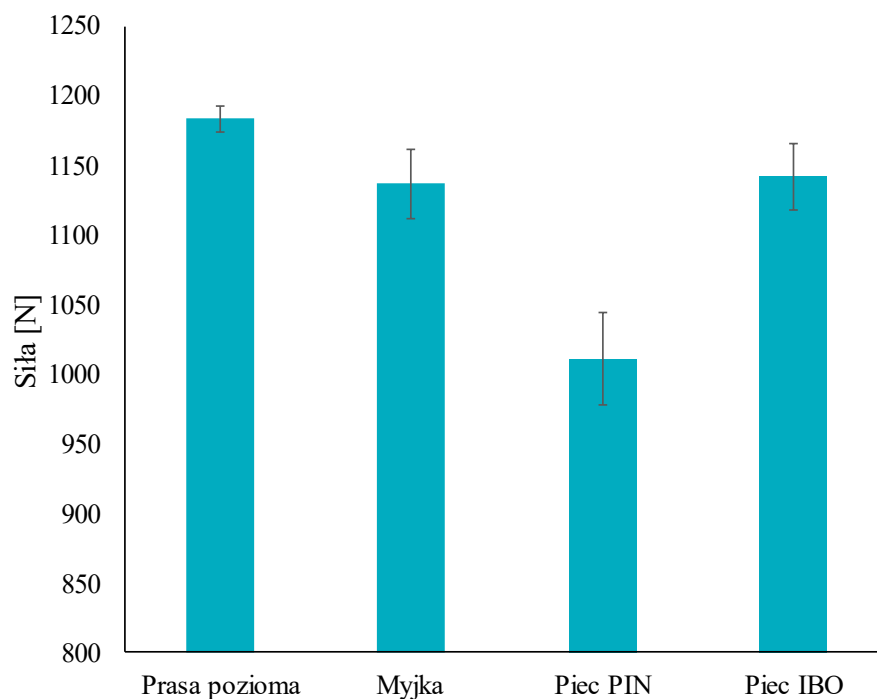
Rys. 8.4 a) wykres siły osiowej osiągananej przez puszkę podczas testu ściskania osiowego, b) profil ciśnienia w puszcze podczas testu wybruszenia denka

Test ściskania osiowego puszeki (Axial Load Force - ALF), jak sama nazwa wskazuje, polega na ściskaniu osiowym puszeki na specjalnie do tego przygotowanym stanowisku, aż do momentu gwałtownego spadku siły, czyli najczęściej do momentu załamania poboczniczy puszeki.

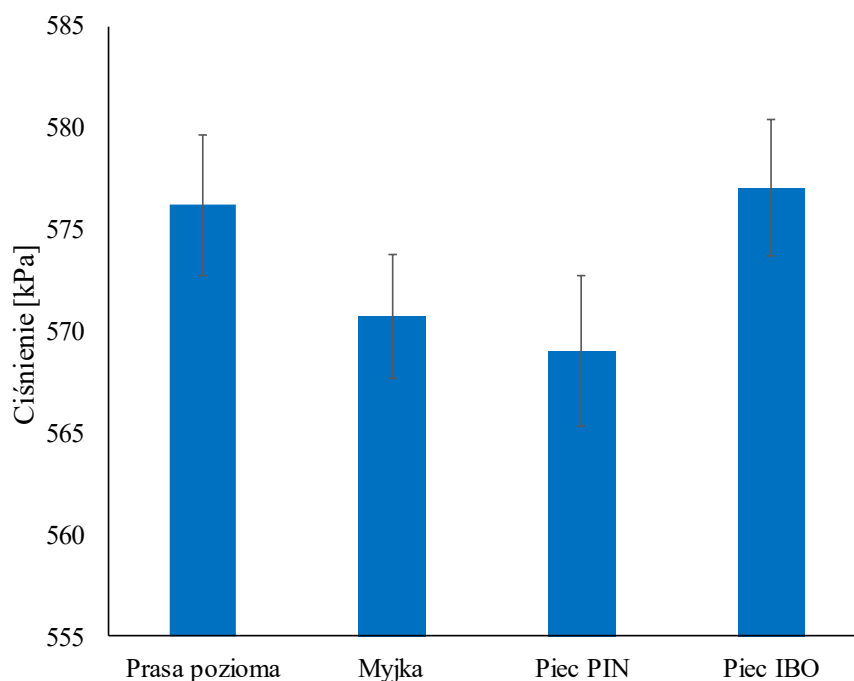
W teście nazywanym ciśnieniem wybruszenia denka (Dome Reversal Pressure – DRP) do wnętrza puszeki tłoczone jest powietrze pod coraz wyższym ciśnieniem i sprawdzana jest jego wartość do momentu gwałtownego spadku ciśnienia, czego przyczyną jest odwrócenie czaszy denka puszeki i nagłe zwiększenie objętości opakowania. Podobny test przeprowadzany jest dla wieczka puszeki [67]. Celem obu tych testów jest sprawdzenie czy denko oraz wieczko puszeki, mają wystarczającą wytrzymałość aby ciśnienie panujące w puszcze po napełnieniu napojem, nie spowodowało trwałego odkształcenia obu tych elementów.

W celu oceny wpływ temperatury występujące podczas pośrednich etapów produkcji na mechaniczne własności puszeki, pobrano próbki po etapach formowania (Prasa pozioma), mycia (Myjka) , suszenia w piecu pinowym (Piec PIN) oraz suszenia lakieru wewnętrznego (Piec IBO). Puszeki po poszczególnych etapach zostały następnie przetestowane w teście ściskania osiowego oraz w teście ciśnienia wybruszenia denka. Test DRP został

przeprowadzony na standardowym stanowisku testowym, wykorzystywanym podczas kontroli jakości puszek. Test ALF wykonano w warunkach laboratoryjnych, na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Każde badanie powtórzono 7-10 razy, a zebrane wyniki testów przedstawiono na Rys. 8.5 i Rys. 8.6.



Rys. 8.5 Wyniki osiągniętej maksymalnej siły osiowej w teście ściskania osiowego aluminiowej puszkii napojowej po etapach formowania (Prasa pozioma), mycia (Myjka), suszenia litografii w piecu piniowym (Piec PIN) oraz suszenia lakieru wewnętrznego w piecu (Piec IBO)



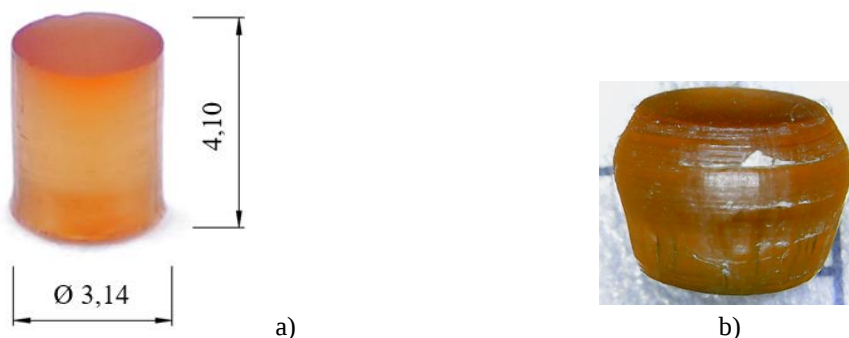
Rys. 8.6 Wyniki osiągniętego ciśnienia w teście wybrzuszenia denka puszkii napojowej po etapach formowania (Prasa pozioma), mycia (Myjka), suszaniem litografii w piecu piniowym (Piec PIN) oraz suszenia lakieru wewnętrznego w piecu (Piec IBO)

Jak wynika z przeprowadzonych badań, po procesie formowania korpusu puszki w prasie poziomej, materiał puszki jest najbardziej umocniony, co przekłada się na wysokie wartości otrzymywanej siły w teście ALF (Rys. 8.5) oraz wysokie wartości ciśnienia, które powoduje odwrócenie denka puszki podczas testu DRP (Rys. 8.6). Po etapie mycia puszki oraz suszenia następuje spadek zarówno siły nacisku osiowego oraz ciśnienia wybrzuszenia (Rys. 8.5 i Rys. 8.6 słupki: Myjka), jest to spowodowane suszeniem puszki w temperaturze około 200°C. Po kolejnym etapie nanoszenia litografii i suszenia, widoczny jest dalszy spadek wartości ciśnienia wybrzuszenia denka puszki oraz siły nacisku osiowego (Rys. 8.5 i Rys. 8.6 słupki: Piec PIN). Wyniki te są zgodne z wynikami badań materiału puszki (Rys. 8.2 oraz Rys. 8.3).

Po etapie nanoszenia lakieru wewnętrznego i następującego po nim suszenia w piecu IBO (Rys. 8.5 i Rys. 8.6 słupki: IBO), wartość siły osiowej oraz ciśnienia istotnie wzrastają. Otrzymane w obu testach wyniki, osiągają poziom zbliżony do poziomu uzyskanego dla puszek bezpośrednio po procesie formowania w prasie poziomej. Po analizie danych oraz warunków przeprowadzenia testów puszek oraz materiału puszki stwierdzono, że obserwowane zjawisko może być spowodowane naniesioną warstwą lakieru. Ze względu na niewielką grubość lakieru (5µm), w porównaniu z grubością ścianki puszki (około 100 µm) oraz niższe parametry mechaniczne lakieru w porównaniu z materiałem puszki, wniosek ten nie wydawał się oczywisty. W związku z tym, wpływ warstwy lakieru, wymagał dodatkowego potwierdzenia. W celu analizy wpływu warstwy lakieru na wytrzymałość puszki stworzono modele MES testów wybrzuszenia denka oraz ściskania osiowego dla modeli puszki bez warstwy lakieru wewnętrznego oraz z warstwą lakieru o grubości 5 µm. Na potrzeby wykonania modeli oraz symulacji testów ALF i DRP należało w pierwszej kolejności zbadać własności mechaniczne lakieru wewnętrznego.

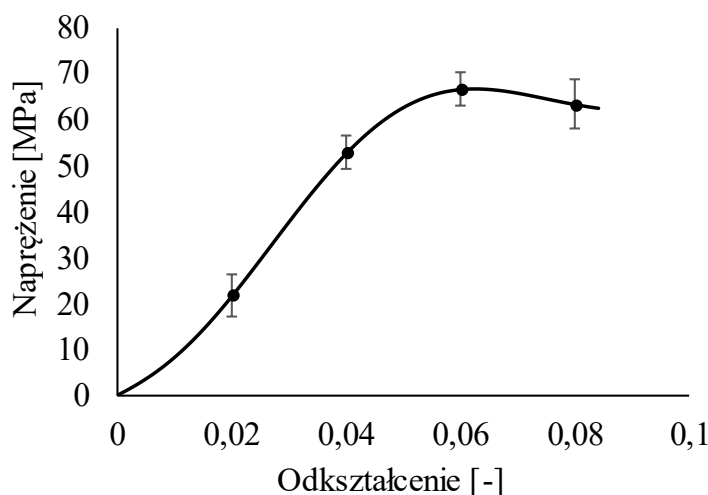
8.3 Badanie własności lakieru wewnętrznego

W celu zbadania własności lakieru wewnętrznego, niezbędnych do wykonania symulacji MES testów puszki, postanowiono przeprowadzić badanie jednoosiowego ściskania lakieru wewnętrznego. W pierwszej kolejności należało przygotować do tego celu próbki lakieru wewnętrznego. Przygotowanie próbek lakieru na bazie żywicy epoksydowej rozpoczęto od wysuszenia odpowiednio grubej warstwy lakieru, z której w kolejnym kroku, za pomocą frezarki numerycznej zostały wycięte walce o stosunku średnicy do wysokości wynoszącym 1,2 (Rys. 8.7 a)).



Rys. 8.7 Rysunek próbek żywicy epoksydowej przygotowanej do testów jednoosiowego ściskania a) oraz przykładowe zdjęcie odkształconej próbki po teście jednoosiowego ściskania b)

Testy ściskania osiowego lakieru wewnętrznego wykonano na maszynie Zwick250 przy prędkości odkształcenia 0.08 s^{-1} . Przykładowe zdjęcia próbki przed i po odkształceniu pokazano na Rys. 8.7 a) i b) odpowiednio. Badanie zostało powtórzone 6 razy, a na Rys. 8.8, w formie zależności naprężenia od odkształcenia, podano uśrednione wyniki tych badań. Natomiast w Tabeli 8.1 podano wartości parametrów mechanicznych lakieru, uzyskanych na podstawie krzywych naprężenie – odkształcenie.



Rys. 8.8 Uśrednione wyniki sześciu prób ściskania jednoosiowego próbek lakieru wewnętrznego

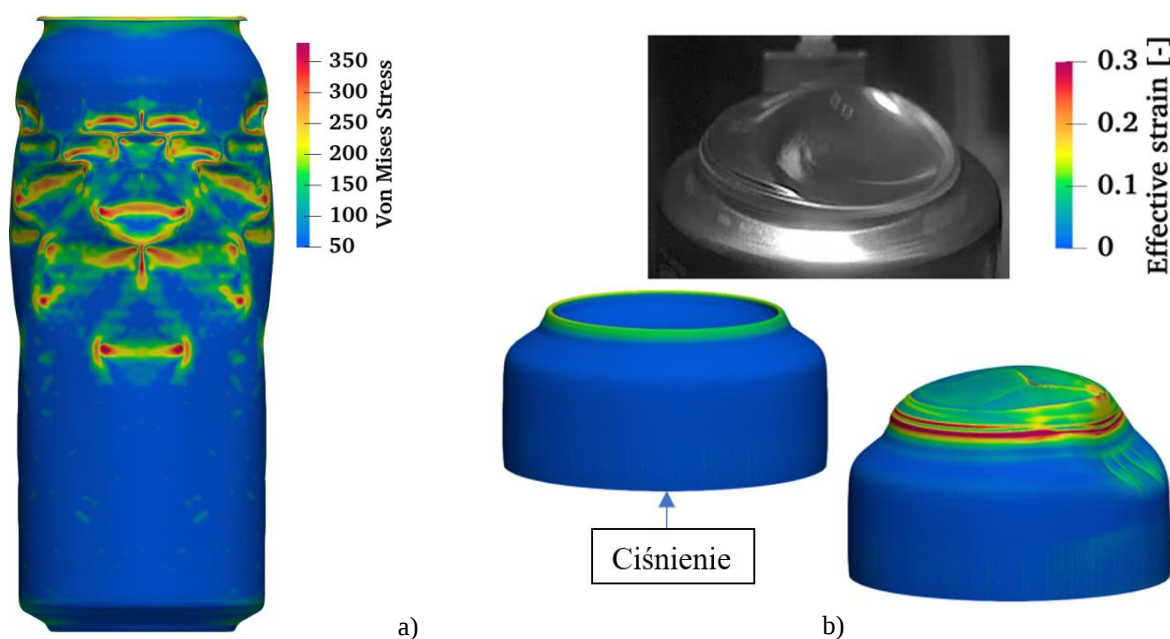
Tabela 8.1 Podsumowanie wyników testu jednoosiowego ściskania próbek lakieru wewnętrznego

Próbka	E (GPa)	Rp (MPa)	Rm (MPa)
Średnia	$1,76 \pm 0,23$	$64,43 \pm 11,36$	$67,94 \pm 3,58$

8.4 Symulacje testów jakościowych puszek

Jak wykazano w literaturze [68] jest wiele czynników które wpływają na poziom siły uzyskiwanej w teście ściskania osiowego jak również na obszar zniszczenia puszki podczas tego testu. Natomiast, nikt do tej pory nie sprawdzał wpływu naniesionej warstwy lakieru

wewnętrznego na wyniki testu ALF. Podobny, lub większy wpływ lakieru może być widoczny w wynikach testu DRP, ponieważ świeżo nałożony lakier ma tendencje do spływania w dolną część puszkę, tworząc tam po wysuszeniu grubszą warstwę niż uzyskuje się na ścianie. Aby przeanalizować wpływ, warstwy lakieru wewnętrznego na wyniki osiągane w obu testach jakościowych, stworzono modele MES puszkę napojowej bez warstwy lakieru oraz z warstwą lakieru o stałej grubości wynoszącej 5 μm .



Rys. 8.9 a) naprężenia [MPa] na ścianie puszkę po teście ALF b) obszar odkształcenia dna puszkę w trakcie testu DRP

Otrzymane wyniki symulacji numerycznych jakościowo potwierdzają obserwowany w eksperymencie wpływ naniesionej warstwy lakieru na wyniki testów ściskania osiowego jak również wybrzuszenia dna. Różnice uzyskane w symulacjach numerycznych, są niższe niż w testach eksperymentalnych. Wpływ na to może mieć faktyczna grubość warstwy lakieru oraz jej rozkład na wewnętrznej stronie puszkę, który jak wiadomo nie jest równomierny i może wynosić od kilku do kilkunastu mikrometrów w zależności od miejsca.

Tabela 8.2 Wyniki symulacji testu ściskania osiowego oraz wybrzuszenia dna

Model numeryczny oraz różnica	Siła osiowa (ALF) (N)	Ciśnienie (DRP) (kPa)	Grubość lakieru (μm)
Bez warstwy lakieru	1231	583	0,00
Z warstwą lakieru	1273	588	5,00
Różnica	42	5	5

Jak wspomniano we wstępie, na proces powstawania aluminiowej puszkę napojowej składają się nie tylko etapy formowania materiału jakim jest stop aluminium 3104 H19 ale także etapy

pośrednie. Są to etapy mycia, suszenia oraz nanoszenia lakieru, które mają istotny wpływ na końcową jakość produktu. Po przeprowadzeniu badań jednoosiowego rozciągania próbek wyciętych z pobocznic puszki po etapach: mycia, suszenia w piecu PIN oraz piecu IBO, zauważono wyraźny spadek wytrzymałości na rozciąganie oraz wartości umownej granicy plastyczności. Początkowo zakładano że spadek własności mechanicznych aluminium będzie miał proporcjonalne odzwierciedlenie w wynikach testów ALF oraz DRP puszki. Jednak tendencja, widoczna w wynikach testu jednoosiowego rozciągania próbek materiału wyciętych z pobocznic puszki pokrywała się z tendencją testów ALF i DRP tylko do etapu suszenia lakieru wewnętrznego w piecu IBO. Otrzymane wyniki w teście ściskania osiowego oraz wybrzuszenia denka puszki były wyższe po etapie suszenia w piecu IBO niż po etapie suszenia w piecu PIN i zbliżyły się do poziomu osiąganego dla puszek zaraz po formowaniu w prasie poziomej. Należy przypomnieć, że próbki do badań jednoosiowego rozciągania wycięte z pobocznic puszki zostały pozbawione warstwy lakieru wewnętrznego oraz zewnętrznej warstwy litografii. Warstwy te zostały usunięte aby umożliwić pomiar grubości próbek przed testem. Nie zakładano wtedy, że warstwa lakieru wewnętrznego bądź zewnętrznego będzie miała widoczny wpływ na wartości sił uzyskiwanych w próbie jednoosiowego rozciągania. Grubość aluminiowej ścianki puszki napojowej wynosi około 100 μm a granica wytrzymałości R_m stopu wynosi około 330 MPa (Rys. 8.3, słupki IBO). Grubość warstwy lakieru wynosi 5 μm , a granica jego wytrzymałości około 70 MPa (Rys. 8.8). Proste obliczenia sugerują, że siła rozerwania próbki z warstwa lakieru wzrośnie o 0,1% w porównaniu z siłą rozerwania próbki bez lakieru. Otrzymany eksperymentalnie wpływ lakieru wewnętrznego na wyniki testu ALF wynosi +15% (Rys. 8.5), a testu DRP +1.8% (Rys. 8.6). Wpływ lakieru nie może więc zostać wytłumaczony dodatkową wytrzymałością, jaką wnosi warstwa lakieru. Zjawisko to, może być związane z oddziaływaniem lakieru na dużą powierzchnie puszki. Podobne istotne oddziaływanie ultra cienkiej powłoki na zachowanie obiektu w skali makro, odnotowano przy pokryciu warstwą TiN o grubości 30 nm komory sztucznego serca, wykonanej z poliuretanu o grubości około 2 mm [69].

Celem potwierdzenia wysuniętej hipotezy o nieproporcjonalnie wysokim wpływie lakieru na mechaniczne zachowania gotowej puszki wykonano szereg symulacji MES. Przeprowadzone obliczenia numeryczne potwierdziły wpływ warstwy lakieru na wyniki otrzymywane w testach ALF oraz DRP. Wzrost siły ściskania w symulacji wyniósł +3,4%, a ciśnienia w teście wybrzuszenia denka +0,85%, co jest jakościowym potwierdzeniem, ponieważ obie

wartości są znacznie wyższe od wartości +0,1%, uzyskanej na podstawie proporcjonalnego wzrostu wytrzymałości blachy pokrytej lakierem.

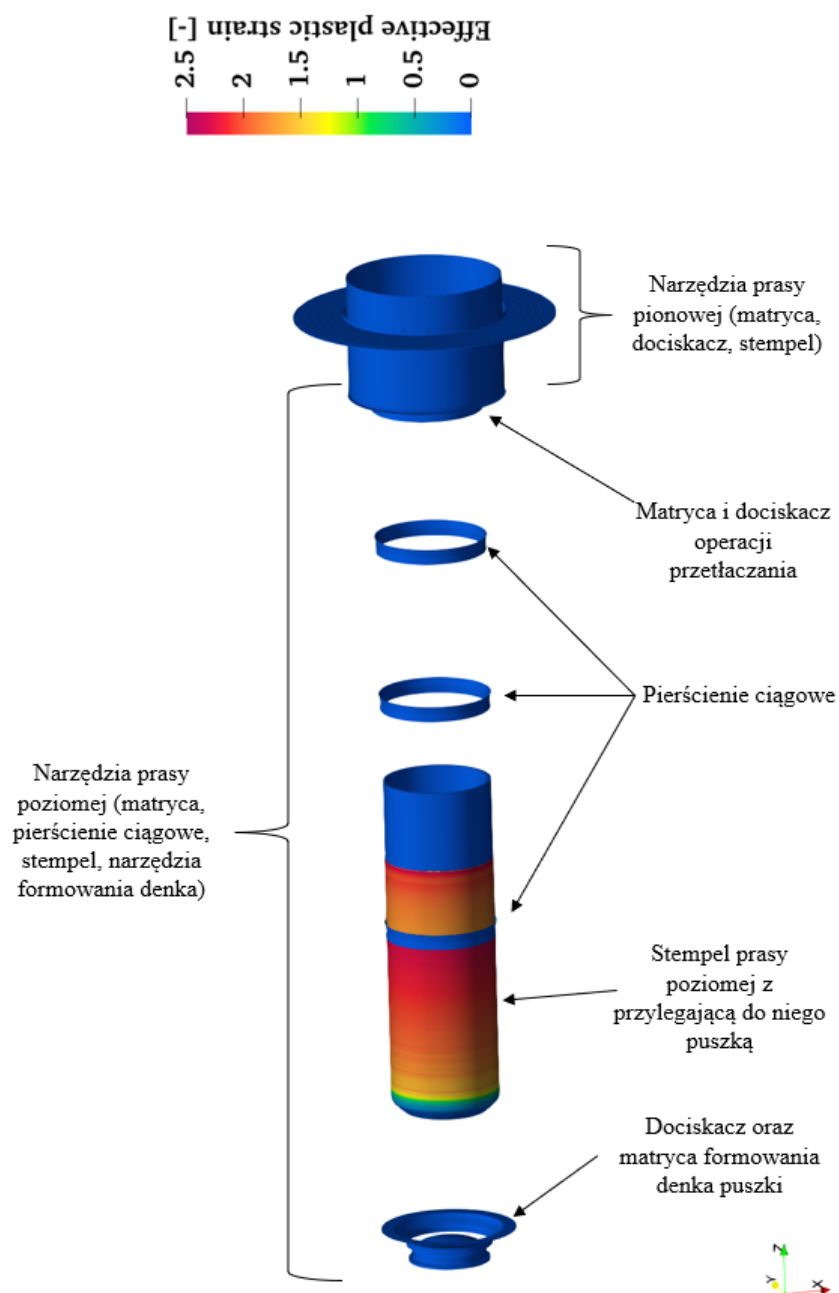
Model numeryczny puszki z lakierem wewnętrznym cechowało uproszczenie w postaci równomiernej warstwy lakieru wewnętrznego o grubości 5 μm . W rzeczywistości warstwa lakieru wewnętrznego charakteryzuje się zmienną grubością, a wynika to zarówno ze sposobu aplikacji lakieru, własności lakieru, czasu oraz pozycji puszki podczas transportu do pieca IBO, jak również czasu po którym następuje całkowite utwardzenie lakieru wewnętrznego. Równomierna warstwa lakieru wewnętrznego stworzona w modelu numerycznych puszki może mieć wpływ na różnice osiąganych wartości sił nacisku osiowego oraz ciśnienia wybrzuszenia względem eksperymentalnych testów.

W tej części pracy zbadano wpływ głównych i pośrednich etapów procesu produkcyjnego puszki napojowej ze stopu 3104 H19 na mechaniczne własności zarówno materiału puszki jak również na gotowego wyrobu. Uzyskane wyniki pozwalają wyciągnąć dwa istotne wnioski, przydatne w dalszej części przeprowadzonych prac:

1. Wpływ temperatury suszenia po operacjach mycia i nanoszenia lakieru jest bardzo istotny. W skutek działania temperatury suszenia 200°C materiał traci powyżej 10% wytrzymałości poprzez spadek stopnia umocnienia materiału, otrzymanego po przeróbce plastycznej na zimno.
2. Wpływ warstwy lakieru na mechaniczne własności gotowej puszki okazał się nieproporcjonalnie wysoki. Zbadany eksperymentalnie wpływ wewnętrznej warstwy lakieru na wyniki testów ściskania osiowego puszki wynosi +15%, a na ciśnienie wybrzuszenia denka +1,8%. Prognozowany na podstawie zasady proporcji wzrost wytrzymałości próbki w badaniach na rozerwanie po nanoszeniu lakieru wynosi 0,1%, a obserwowane w eksperymentach zjawisko potwierdzono wynikami symulacji MES.

9 Symulacje procesu formowania aluminiowej puszki napojowej

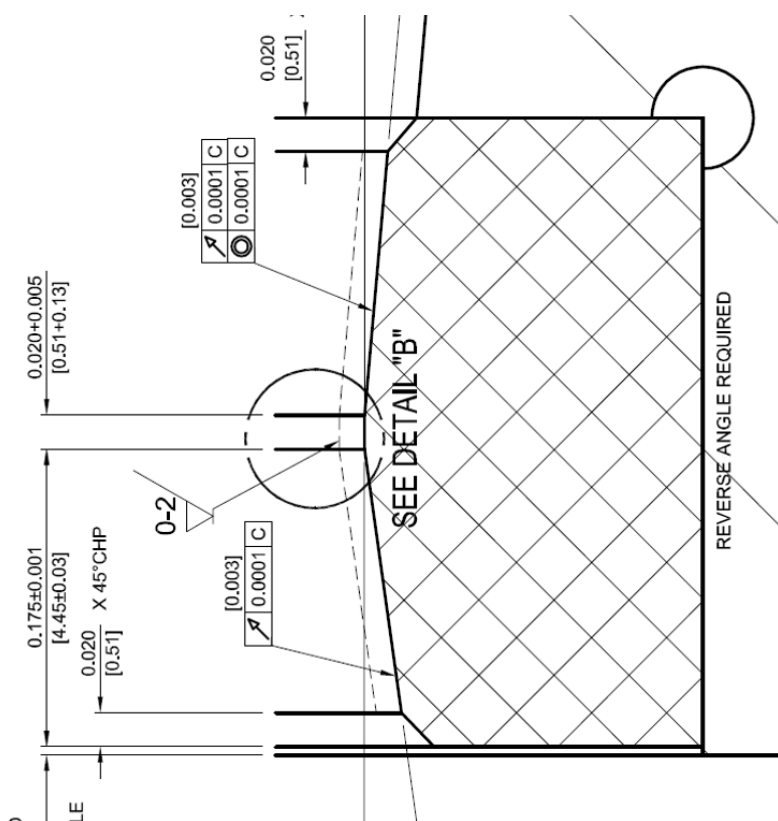
Aby zrealizować założony cel, jakim było opracowanie technologii produkcji puszki napojowej z nowym kształtem kołnierza i szyjki wykonanej ze stopu aluminium serii 3xxx z wykorzystaniem modelu MES, w pierwszej kolejności należało zbudować model numeryczny dla istniejących warunków brzegowych procesu. Analiza wyników symulacji formowania aluminiowej puszki napojowej miała się skupić na obserwacji rozkładu grubości ścianki puszki, dlatego zdecydowano że model numeryczny, będzie modelem osiowosymetrycznym nie uwzględniającym anizotropii materiału.



Rys. 9.1 Widok modelu numerycznego etapów formowania puszki w prasie pionowej oraz prasie poziomej

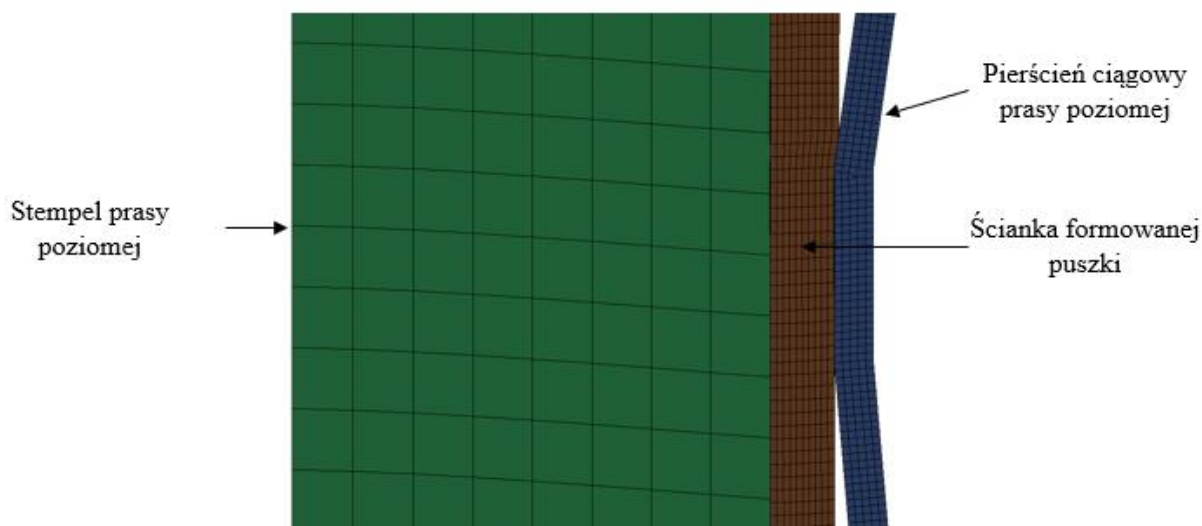
Model numeryczny został przygotowany przy użyciu programu LS-Prepost, który jest dedykowanym pre-procesorem dla solvera LS-Dyna. Analiza oraz wizualizacja wyników została przeprowadzona za pomocą post-procesora ParaView oraz LS-Prepost.

Wstępne symulacje numeryczne miały na celu określenie wymaganej liczby elementów na przekroju ścianki puszki, która pozwoliłaby na uzyskanie stabilnych wyników. Zaobserwowano, że podczas etapu pocieniania ścianki, operacji odbywającej się na prasie poziomej, przy zwiększającej się liczbie elementów na przekroju ścianki, finalna grubość ścianki zmniejszała się. Jedną z przyczyn tej zależności jest mały rozmiar obszaru formującego w pierścieniu ciągowym prasy poziomej Rys. 9.2.



Rys. 9.2 Rysunek techniczny pierścienia ciągowego wykorzystywanego w prasie poziomej podczas operacji pocieniania ścianki puszki

Za pomocą serii symulacji modeli puszki o różnej ilości elementów na przekroju ścianki puszki wyznaczono minimalną liczbę dziewięciu elementów gwarantującą stabilność wyników. Taka ilość elementów na przekroju ścianki modelu puszki przestała mieć wpływ na grubość ścianki puszki. W ostatecznym modelu numerycznym puszki stworzono siatkę 10 elementów na przekroju ścianki puszki (Rys. 9.3).

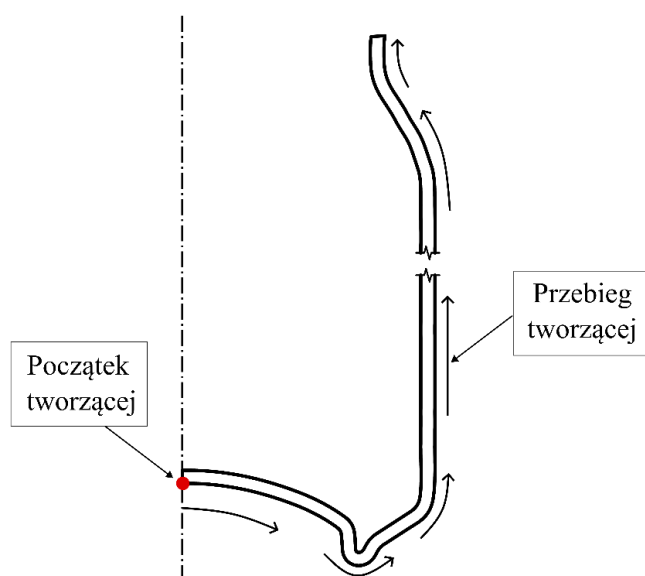


Rys. 9.3 Fragment modelu numerycznego zawierający od lewej: stempel prasy poziomej, ścianka puszki, pierwszy pierścień ciągowy prasy poziomej

W modelu zdefiniowano kontakt pomiędzy tłoczoną puszką a wszystkimi narzędziami przy pomocy karty *2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE [70]. Narzędzia tłoczące zostały zdefiniowane jako typ RIGID za pomocą elementów typu shell (typ=15). Współczynnik tarcia pomiędzy narzędziami, a stopem aluminium 3104 przyjęto dla współczynnika statycznego i dynamicznego odpowiednio $\mu_s = 0,1$ i $\mu_D = 0,05$, natomiast dla pary kontaktowej aluminium-stempel $\mu_s = 0,15$ i $\mu_D = 0,1$ [71]. Początkowa grubość blachy aluminiowej ze stopu 3104 H19 wynosiła 0,240 mm, a we wstępnych symulacjach wykorzystano model umocnienia materiału opisany zależnością Hocket-Sherby (7.1)**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** Siła dociskacza w pierwszym etapie tłoczenia wynosiła 9,3 kN, a w etapie przetłaczania 24kN. Bazując na opisanych warunkach brzegowych oraz kształcie narzędzi tłoczących, przeprowadzone zostały wstępne symulacje pierwszych pięciu etapów formowania aluminiowej puszki napojowej. Symulacje te zostały wykorzystane do stworzenia nowej krzywej umocnienia stopu aluminium 3104 w stanie umocnienia H19 dla odkształceń od 0 do około 200%, pokrywający zakres odkształceń występujących w procesie formowania aluminiowej puszki napojowej. Po opracowaniu nowego modelu umocnienia materiału, opisanego równaniem Hansla-Spiettel'a (7.2), został on zaimplementowany w modelu numerycznym. Tak zdefiniowane warunki brzegowe model procesu formowania puszki na prasie pionowej oraz poziomej zostały wykorzystane do opracowania nowego kształtu stempla tłoczącego prasy poziomej.

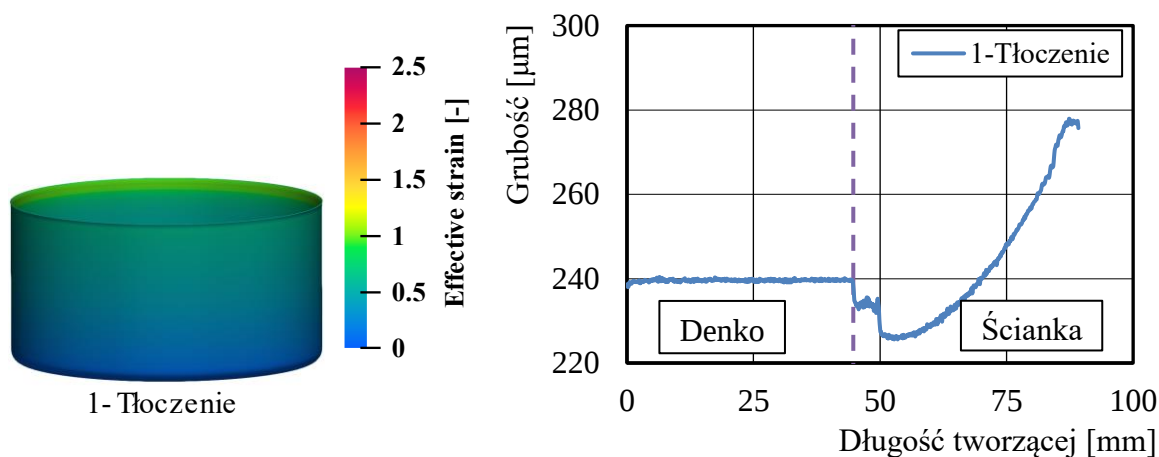
9.1 Prasa pionowa oraz prasa pozioma

Z punktu widzenia założonego celu, jednym z najistotniejszych parametrów, które były analizowane za pomocą modelu numerycznego, był rozkład grubości ścianki puszki. Poniżej, na rysunkach od Rys. 9.5 do Rys. 9.9 znajdują się wyniki symulacji formowania aluminiowej puszki napojowej w postaci map odkształceń plastycznych po etapach formowania wytłoczki, przetłaczania wytłoczki oraz trzech etapach wyciągania ścianki. Obok wyników przedstawiających rozkład odkształceń plastycznych, znajdują się wykresy prezentujące rozkład grubości ścianki formowanej puszki w funkcji długości tworzącej, zaczynającej się w osi puszki.

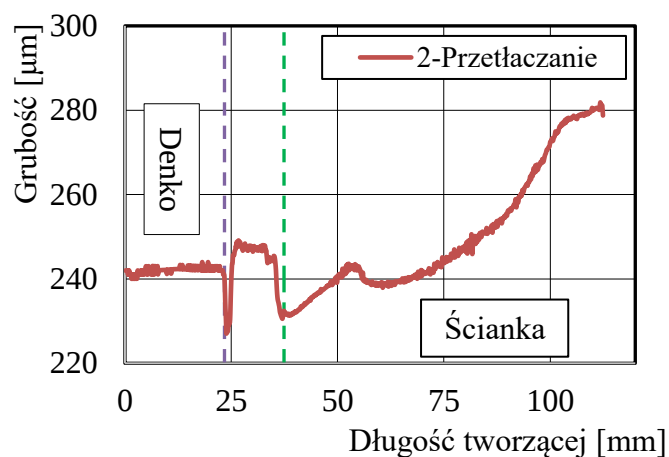
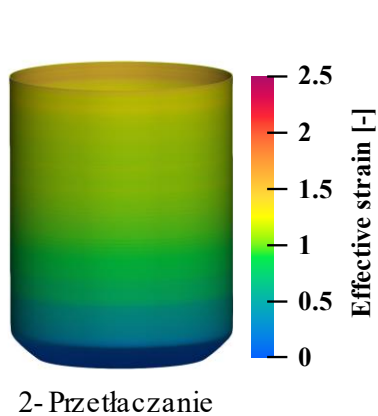


Rys. 9.4 Schemat przebiegu tworzącej

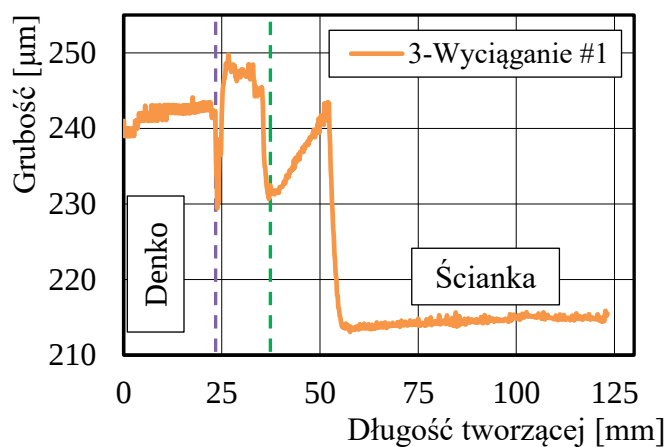
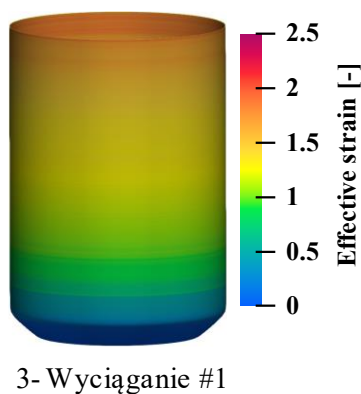
Liniami przerywanymi na wykresach został zaznaczony obszar pomiędzy denkiem wytłoczek, a ich ściankami.



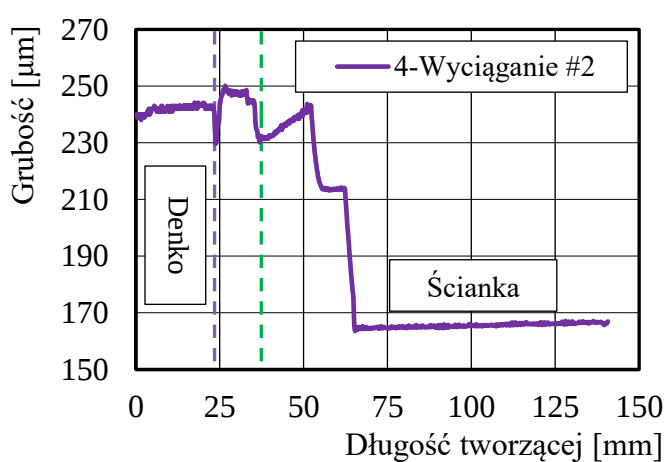
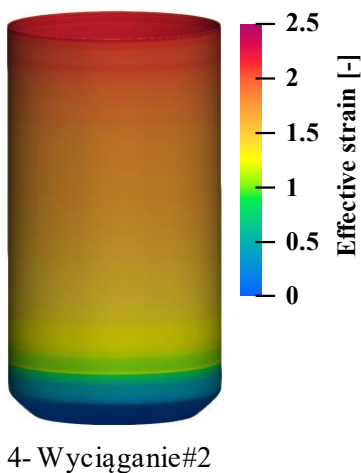
Rys. 9.5 Mapa odkształceń plastycznych na wytłoczce po etapie formowania w prasie pionowej oraz jej rozkład grubości przedstawiony na wykresie



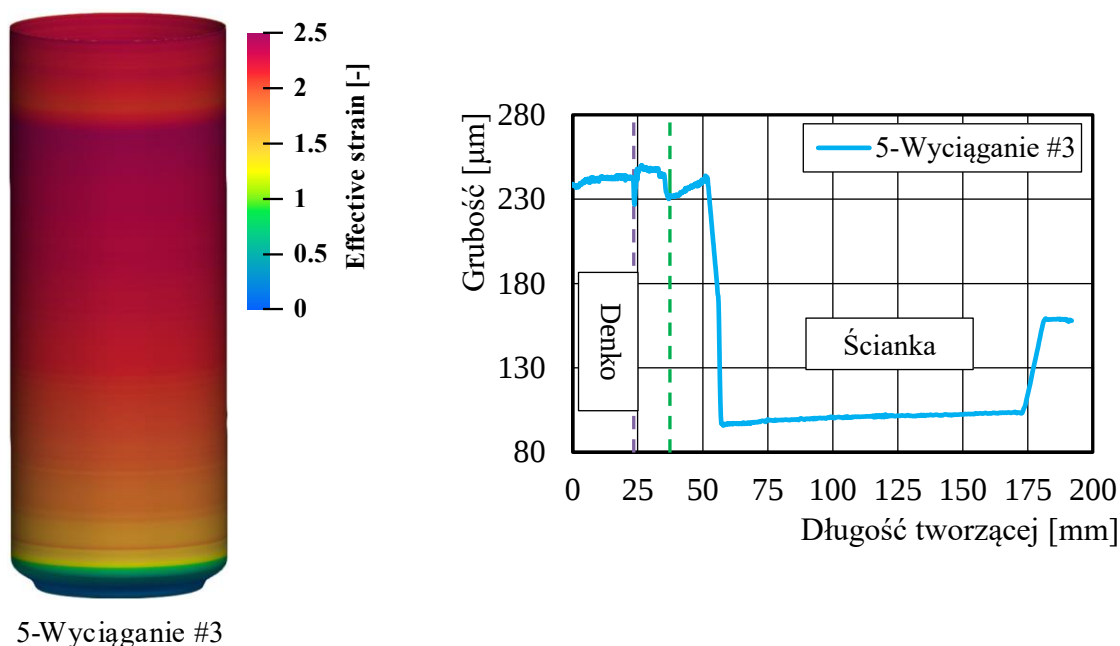
Rys. 9.6 Mapa odkształceń plastycznych na wylotce po etapie przetłaczania w prasie poziomej oraz jej rozkład grubości przedstawiony na wykresie



Rys. 9.7 Mapa odkształceń plastycznych na wylotce po pierwszym etapie wyciągania ścianki w prasie poziomej oraz jej rozkład grubości przedstawiony na wykresie



Rys. 9.8 Mapa odkształceń plastycznych na wylotce po drugim etapie wyciągania ścianki w prasie poziomej oraz jej rozkład grubości przedstawiony na wykresie



Rys. 9.9 Mapa odkształceń plastycznych na wytłoczce po trzecim etapie wyciągania ścianki w prasie poziomej oraz jej rozkład grubości przedstawiony na wykresie

Stworzony model numeryczny procesu formowania aluminiowej puszki napojowej w prasie pionowej oraz prasie poziomej pozwolił na uzyskanie bardzo dokładnych wyników rozkładu grubości na ściance puszki. Dzięki otrzymanym za pomocą tego modelu wynikom, możliwa jest łatwa oraz precyzyjna obserwacja grubości ścianki puszki w każdym jej miejscu, co fizycznie wymagałoby specjalistycznej aparatury oraz długiego czasu oczekiwania na wyniki. Dodatkowo, dla każdej zmiany kształtu narzędzi tłoczących i analizy rozkładu grubości ścianki puszki wykonanej za ich pomocą, konieczny byłby nowy zestaw kosztownych narzędzi prototypowych. Na zaprezentowanych wynikach widać wyraźnie, że rozkład grubości ścianki puszki, a co za tym idzie rozkład odkształceń plastycznych w puszcze nie są jednolite.

Osobą nie zaznajomionym z procesem produkcyjnym aluminiowej puszki napojowej wydawać by się mogło że ścianka puszki posiada wszędzie taką samą grubość. Po dokładniejszym zapoznaniu się z konstrukcją puszki oraz jej technologią produkcji okazuje się że grubość ścianek puszki nie jest stała, a jej wartość jest ściśle powiązana z wymaganiami wytrzymałościowymi bądź ograniczeniami technologicznymi. Dzięki stworzonemu modelowi numerycznemu obserwacja zmian grubości materiału podczas procesu jest bardzo prosta i łatwo zauważyć że grubość ścianki puszki mieści się w zakresie od 90 μm do grubości materiału wsadowego wynoszącej 240 μm. Opracowany model daje również możliwość teoretycznej modyfikacji grubości ścianki puszki w każdym obszarze.

9.2 Symulacje procesu zawężania

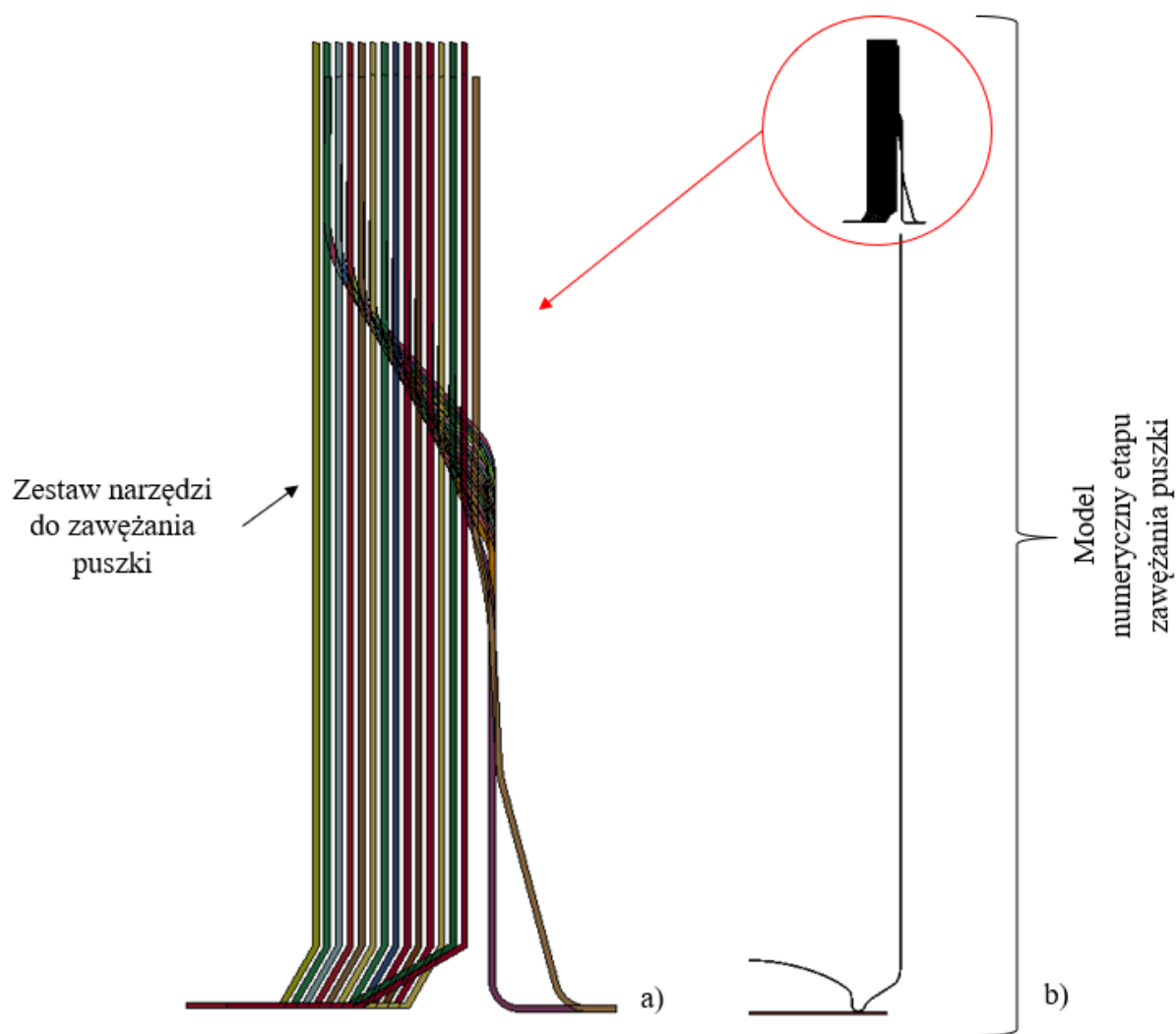
Celem numerycznych symulacji procesu zawężania aluminiowej puszkii napojowej było odwzorowanie kształtu puszkii w górnej jej części oraz możliwość obserwacji zachowania materiału puszkii podczas tego procesu. W przeanalizowanej literaturze dotyczącej tego i podobnych procesów, widoczna była zmiana grubości ścianki w tym regionie podczas formowania szyjki i kołnierza [72]. Obserwacja tego zjawiska była podstawą do zdefiniowania celu oraz hipotez prowadzonych prac badawczych. W związku z zdefiniowanym celem pracy oraz narzędziami jakie zdecydowano się użyć aby osiągnąć założony cel, należało stworzyć modele numeryczne wszystkich etapów procesu formowania aluminiowej puszkii napojowej. Jednym z tych etapów jest właśnie proces formowania szyjki oraz kołnierza aluminiowej puszkii napojowej. Jest to również etap, który występuje po etapach mycia oraz dwóch etapach suszenia poprzedzonych nakładaniem zewnętrznej litografii oraz lakieru wewnętrznego. Analiza wpływu podwyższonej temperatury sięgającej 200°C oraz wewnętrznej warstwy lakieru, wykazała istotny udział tych czynników na materiał puszkii (Rys. 8.2 oraz Rys. 8.3) oraz samą puszkę (Rys. 8.5 oraz Rys. 8.6). W związku z tym istotne było aby czynniki te zostały uwzględnione w modelu numerycznym procesu zawężania aluminiowej puszkii napojowej. Proces formowania szyjki puszkii został przedstawiony z szczegółami w rozdziale dotyczącym technologii produkcji.



Rys. 9.10 Matryca formująca szyjkę oraz kołnierz puszkii

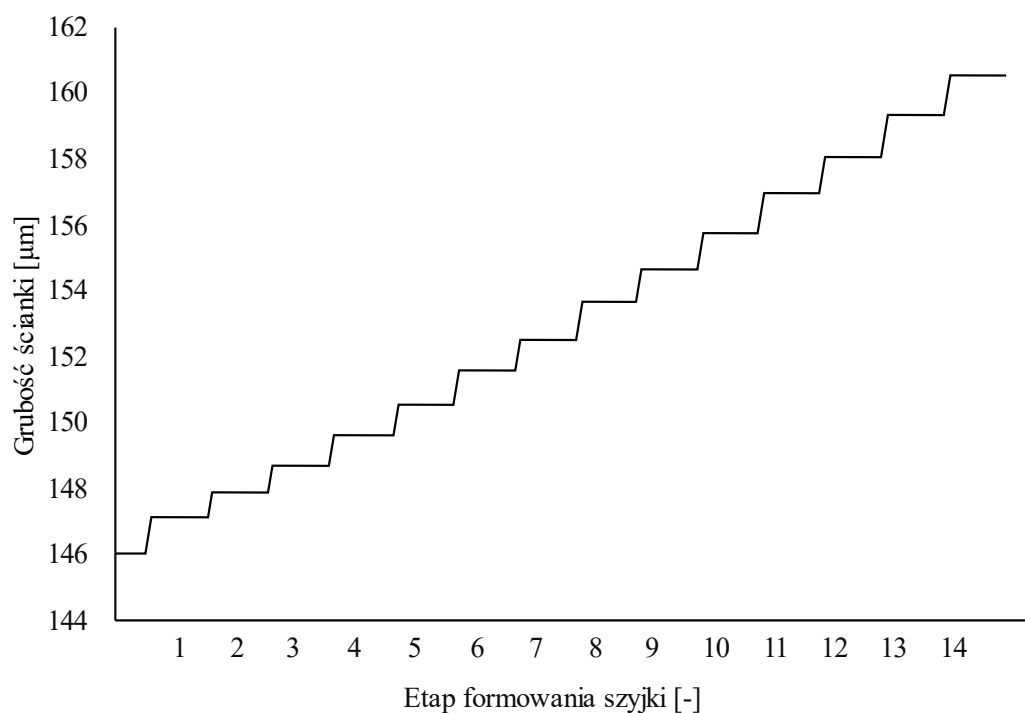
Jak wiadomo z opisu tego etapu procesu, jest on prowadzony na maszynie zwanej zawężarko-krawędziarka, składającej się z 14 stacji formujących szyjkę puszek. Każda z tych stacji to zestaw matryc (Rys. 9.10) oraz pilotów o odpowiednim kształcie, wymaganym aby nadać puszcze zaprojektowany kształt szyjki bez powstawania wad w postaci zmarszczeń, zagnieceń, wyrwań oraz innego rodzaju uszkodzeń.

Tuż przed pierwszą stacją formującą, na górną część puszek aplikowany jest specjalny środek, którego celem jest zmniejszenie tarcia pomiędzy materiałem puszek a formującymi go narzędziami. W symulacjach numerycznych, obecność środka smarnego została uwzględniona poprzez odpowiednią korektę wartości współczynników tarcia. Dla pary kontaktowej puszka-narzędzie zewnętrzne (matryca) przyjęto współczynnik tarcia statycznego $\mu_s = 0,1$ oraz współczynnik tarcia dynamicznego $\mu_D = 0,05$. Natomiast dla kontaktu pomiędzy materiałem puszek a narzędziem wewnętrznym (pilotem) współczynniki wynosiły odpowiednio $\mu_s = 0,1$ i $\mu_D = 0,05$. Model numeryczny składał się z geometrii puszek napojowej, która była wynikiem symulacji numerycznej wcześniejszych etapów formowania, zestawu 14 pilotów i szklanek formujących oraz podstawy na której spoczywa puszka w trakcie formowania. Wszystkie narzędzia formujące zostały zdefiniowane jako typ RIGID. W procesie produkcyjnym, dla zwiększenia stabilności puszek w trakcie formowania szyjki do wnętrza puszek wtłaczane jest powietrze, które wywiera naciska na jej wewnętrzne ścianki i zwiększa jej sztywność. W modelu numerycznym, zostało to uwzględnione poprzez zastosowanie równomiernego obciążenia wewnętrznej strony puszek ciśnieniem o wartości równej 100 kPa. W modelowaniu tego etapu procesu, zostały wykorzystane dane materiałowe, opisane we wcześniejszym rozdziale, uzyskane podczas badań wpływu temperatury występującej w procesie na materiał puszek. Dane materiałowe do modelu numerycznego pochodziły z badań plastometrycznych materiału w punkcie P3 (Rys. 8.1 a)), który przeszedł przez etapy mycia, suszenia w piecu PIN oraz piecu IBO. W modelu numerycznym została również uwzględniona warstwa lakieru wewnętrznego o parametrach przedstawionych w rozdziale 8.3.

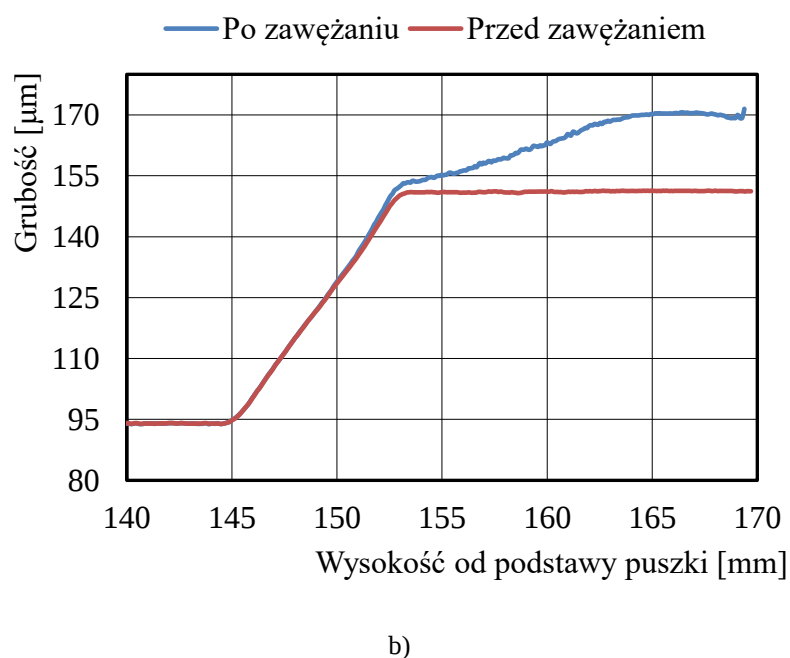
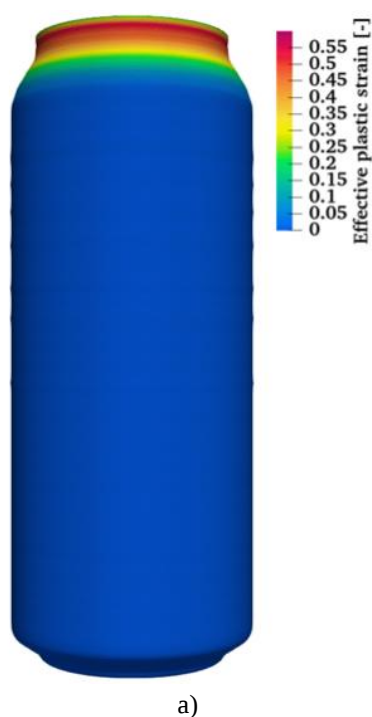


Rys. 9.11 b) widok ogólny narzędzi modelu numerycznego procesu zawężania puszkii napojowej a) powiększenie modelu numerycznego narzędzi do zawężania puszkii napojowej

Wynikiem otrzymanych symulacji numerycznych procesu formowania szyjki aluminiowej puszkii napojowej jest puszkia z zawężoną jej górną częścią. Dzięki modelowi numerycznemu oraz przeprowadzonym obliczeniom w łatwy sposób można śledzić zmianę grubości ścianki podczas tego procesu (Rys. 9.12). Można również w precyzyjny sposób ocenić finalny kształt szyjki oraz rozkład grubości ścianki puszkii (Rys. 9.13). Analiza wyników w tym obszarze jest szczególnie istotna z punktu widzenia realizacji zamierzonego celu, czyli modyfikacji rozkładu grubości szyjki i kołnierza formowanej z ścianki grubej powstałej w puszcze na prasie poziomej.



Rys. 9.12 Przyrost grubości ścianki puszki podczas czternastu kroków etapu zawężania



Rys. 9.13 Mapa odkształceń plastycznych na wytłoczce po etapie zawężania a) oraz rozkład grubości jej ścianki b)

10 Efekty przeprowadzonych prac

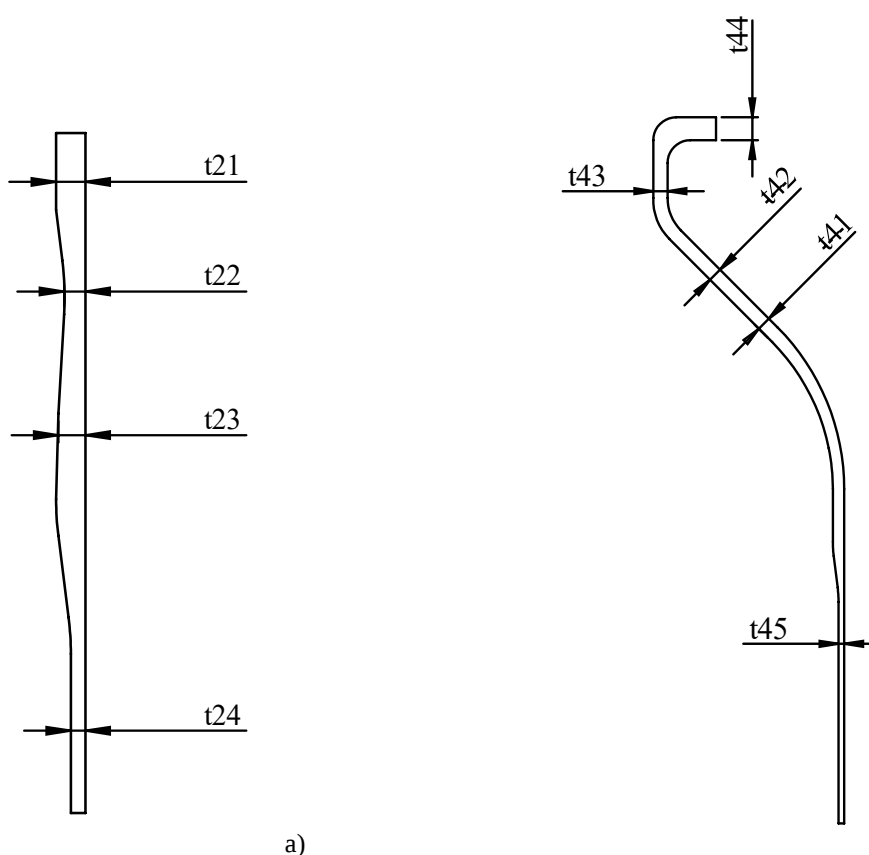
Dzięki przeprowadzonym badaniom umocnienia stopu aluminium 3104 H19 w trakcie procesu produkcji aluminiowej puszki napojowej oraz analizie wpływu temperatury występującej w tym procesie na materiał puszki, możliwe było stworzenie pełnego modelu numerycznego procesu produkcyjnego aluminiowej puszki napojowej. Stworzone modele numeryczne dwóch istotnych testów jakościowych, ściskania osiowego puszki - ALF oraz testu wybrzuszenia denka - DRP pozwalają na ocenę wytrzymałości nowych modeli puszek otrzymanych za pomocą symulacji numerycznych procesu formowania. Modele te zostały stworzone aby w wirtualny sposób, bez konieczności wykonywania dużej liczby prototypowych narzędzi opracować nowy stempel tłoczący prasy poziomej, dzięki któremu uzyskano puszkę o zamierzonym rozkładzie grubości ścianki w obszarze jej szyjki i kołnierza. Kształt stempla formującego grubą ściankę puszki, która w kolejnym etapie jest zawężana i tworzy szyjkę puszki miał kompensować występujący na tym etapie przyrost grubości tak aby finalna grubość ścianki puszki była stała. Analiza symulacji zawężania puszki umożliwiła precyzyjną obserwację tego obszaru podczas oraz po formowaniu, potwierdzono że rozkład grubości ścianki puszki w obszarze szyjki i kołnierza jest ściśle powiązany z jej kształtem (Rys. 9.13 b).

10.1 Nowy stempel tłoczący

Stworzony model numeryczny procesu formownia aluminiowej puszki napojowej umożliwił przetestowanie stworzonego stempla tłoczącego prasy poziomej o zmodyfikowanym kształcie. Podczas fazy projektowania nowego stempla pojawiły się pewne ograniczenia związane z aktualną technologią produkcji tego typu narzędzi, dlatego też jego finalny kształt nieznacznie różni się od pierwszej teoretycznej wersji.

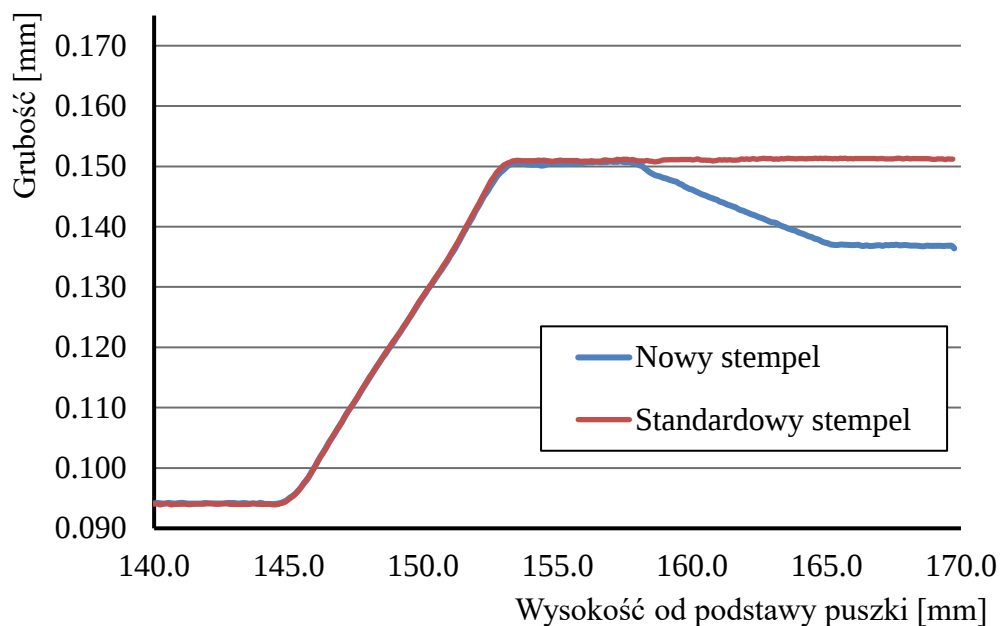
Jak wspomniano we wcześniejszych rozdziałach, podczas procesu zawężania prostej ścianki puszki, o stałej grubości $t_{11}=t_{12}=t_{13}$ (Rys. 6.1a) grubość ścianki zwiększa się proporcjonalnie do zmiany średnicy puszki $t_{33}>t_{32}>t_{31}$ (Rys. 6.1 b). Na podstawie wyników obliczeń procesu formowania oraz zawężania puszki przy wykorzystaniu standardowego stempla oraz analizy rozkładu i zmiany grubości ścianki puszki, opracowano stempel o częściowo zmodyfikowanym kształcie. Wprowadzona modyfikacja dotyczyła obszaru stempla prasy poziomej, odpowiedzialnego za formowania górnej części puszki zwanej ścianką grubą.

Otrzymana ścianka gruba o zmiennej grubości $t_{23} > t_{22}$ i $t_{22} < t_{21}$ przedstawiona została schematycznie na Rys. 10.1 a). Jest to obszar, z którego w późniejszym etapie formowana jest szyjka oraz kołnierz puszki. Tak zmodyfikowana ścianka gruba pozwala na uzyskanie finalnej puszki z szyjką o stałej grubości ścianki $t_{43} = t_{42} = t_{41}$ (Rys. 10.1 b)). Zaproponowane rozwiązanie nie wpływa na wytrzymałość puszki oraz nie zmienia jej cech użytkowych. Ma natomiast wpływ na zmniejszenie wagi jednej puszki o około 0,05 gram, a zatem na redukcję materiałochłonności procesu produkcyjnego. Ponieważ koszty produkcji aluminiowej puszki napojowej to w 70% wykorzystany do tego celu materiał, a średnia dobowa wydajność jednej linii produkcyjnej wynosi około 3 mln sztuk puszek, przekłada się to na istotne korzyści.

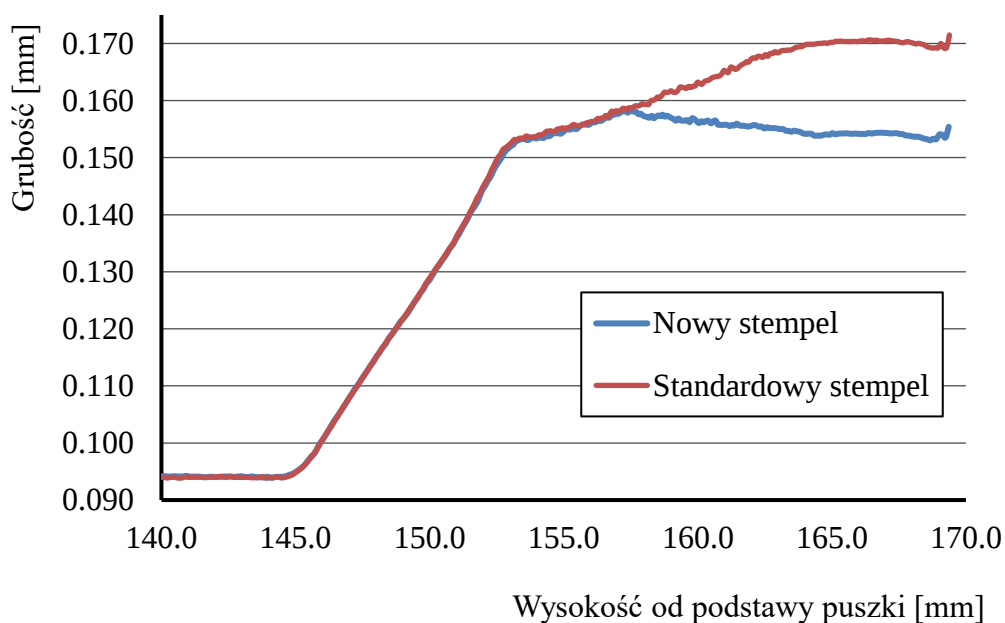


Rys. 10.1 Teoretyczny rozkład grubości grubej ścianki puszki a) przed procesem zawężania b) po procesie zawężania

Po przeprowadzeniu serii symulacji etapów formowania aluminiowej puszki napojowej, analizie otrzymywanych wyników rozkładu grubości ścianki puszki oraz po uwzględnieniu wszystkich ograniczeń technologicznych, otrzymano finalny kształt stempla tłoczącego. Wyniki symulacji przedstawiają w teoretyczny sposób nowy rozkład grubości ścianki grubej (Rys. 10.2) oraz rozkład grubości ścianki puszki w obszarze jej szyjki i kołnierza (Rys. 10.3).



Rys. 10.2 Wyniki numeryczne rozkładu grubości grubej ścianki przed etapem zawężania uzyskane w symulacjach tłoczenia z zastosowaniem standardowego oraz nowego stempla prasy poziomej



Rys. 10.3 Wyniki numeryczne rozkładu grubości grubej ścianki po etapie zawężania uzyskane w symulacjach tłoczenia z zastosowaniem standardowego oraz nowego stempla prasy poziomej

Opracowany dzięki symulacjom numerycznym kształt stempla pozwolił na zmniejszenie grubości, a co za tym idzie objętości materiału ścianki grubej w porównaniu z aktualnie stosowanym rozwiązaniem (Rys. 10.2). Co również wiąże się z powyższym, waga pojedynczej puszki została zmniejszona o 0,05 gram. Otrzymane wyniki symulacji numerycznych są wynikami przybliżonymi, ponieważ aspekty takie jak: współczynnik tarcia oraz model tarcia, sztywność narzędzi, rozszerzalność cieplna narzędzi, wibracje generowane

przez urządzenia tłoczące czy wpływ temperatury otoczenia nie zostały uwzględnione w modelu a część z nich musiała zostać uproszczona. Przez lata obserwacji i zbierania danych z linii produkcyjnych pracujących bez przerwy przez cały rok, zaobserwowano mniejszy bądź większy wpływ tych czynników na wydajność produkcyjną linii oraz jakość otrzymywanych puszek. Aby potwierdzić poprawność stworzonych modeli numerycznych przeprowadzono ich weryfikację poprzez porównanie otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej. W tym celu została opracowana dokumentacja techniczna nowego stempla (Rys. 10.4) prasy poziomej, na podstawie której producent tego typu narzędzi wykonał stempel prototypowy oraz w celach porównawczych stempel standardowy w tej samej tolerancji. Wyprodukowane zgodnie z dokumentacją stemple tłoczące, zostały następnie wykorzystane w testach, dzięki którym możliwe było stworzenie puszek o nowym rozkładzie grubości ścianki grubej. Próbkę otrzymanych puszek, zostały poddane analizie celem porównania z ich wirtualnym odpowiednikiem.

10.2 Warunki przeprowadzania eksperymentu

Testy produkcyjne prototypowego stempla oraz stempla referencyjnego zostały przeprowadzone na jednej z linii produkujących aluminiową puszkę napojową o pojemności 500 ml. Aby zminimalizować wpływ czynników zewnętrznych testy zostały przeprowadzone na jednej z pras poziomych (Rys. 4.2) w trakcie normalnej produkcji. Takie podejście gwarantowało stabilność parametrów procesu, na które wpływ ma temperatura urządzenia, pozostałych narzędzi tłoczących (Rys. 10.5) oraz emulsji smarno-chłodzącej. Prasa pozioma została wyłączona jedynie na krótki czas wymiany narzędzi trwający około 10 min. Po wymianie narzędzi w pierwszej kolejności na stempel referencyjny, przeprowadzono produkcję przy wykorzystaniu tego stempla przez czas około 5 minut. Próbkę pusze zostały pobrane po około dwóch minutach od rozpoczęcia pracy prasy. Te same czynności wykonano dla prototypowego stempla. W ten sposób pobrano po około 750 sztuk puszek wyprodukowanych za pomocą dwóch różnych stempli.

Następnie, puszki zostały umyte podczas standardowego procesu mycia występującego w trakcie produkcji. Część umytych oraz wysuszonych puszek trafiła następnie do pomieszczenia laboratorium z kontrolowanym poziomem temperatury oraz wilgotności. Istotne było aby puszki po procesie mycia znajdowały się przez pewien czas w kontrolowanej atmosferze, ponieważ jak wiadomo z doświadczenia, waga puszek zmienia się jeszcze przez pewien czas od zakończenia procesu mycia. Pozostała część puszek wyprodukowanych za pomocą stempla referencyjnego oraz nowego została przeprowadzona przez pozostałe etapy produkcji aż do etapu zawężania. Po etapie zawężenia wyprodukowane puszki zostały poddane analizie w laboratorium.



Rys. 10.5 Typowy zestaw narzędzi prasy poziomej

10.3 Porównanie wyników symulacji nowego oraz standardowego stempla

W celu sprawdzenia postawionych hipotez przeprowadzono symulacje formowania aluminiowej puszki napojowej przy wykorzystaniu nowego stempla prasy poziomej. Otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami symulacji dla procesu tłoczenia puszki przy zastosowaniu standardowego stempla. Dla dwóch modeli numerycznych otrzymanych puszek porównano: ich wysokość, wagę, oraz kształt szyjki po zawężaniu. Dodatkowo wykonano symulacje numeryczne testu ściskania osiowego puszki (ALF) aby sprawdzić czy miejscem najbardziej wyężonym i ulegającym uszkodzeniu w tym teście pozostaje pobocznica puszki. Wysoka jakość wyników symulacji została potwierdzona dzięki pomiarom puszek wykonanych za pomocą standardowego oraz nowego stempla podczas testów produkcyjnych i przedstawiona w Tabeli 2.1.

Tabela 10.1 Porównanie wyników symulacji numerycznych formowania puszki przy wykorzystaniu nowego oraz standardowego stempla

Parametry puszki	Standardowy stempel		Nowy stempel	
	Symulacja	Testy	Symulacja	Testy
Gruba ścianka min [μm]	150	150	137	138
Grubość kołnierza [μm]	170	169	156	158
Redukcja wagi [gram]	-	-	0,051	0,042
Zmiana wysokości [mm]	-	-	1,0	0,9
Siła osiowa [N]	1180,7	1029,2	1198,8	1030,1
Miejsce uszkodzenia w teście ściskania osiowego	Pobocznica	Pobocznica	Pobocznica	Pobocznica

11 Podsumowanie i wnioski

W pierwszym etapie prac opracowano metodologię umożliwiającą stworzenie modelu umocnienia materiału dla blach ze stopu AA3104 H19 podczas dużych odkształceń plastycznych. Ponieważ nie było możliwe wycięcie ze ścianki puszki standardowych próbek do testów plastometrycznych, opracowano i zweryfikowano zminiaturyzowany próbnik. W modelu numerycznym procesu formowania puszki napojowej określono lokalizacje próbek do testów plastometrycznych oraz efektywne odkształcenie w miejscu pobierania tych próbek. Opracowany model umocnienia materiału obejmuje rzeczywisty zakres odkształcenia plastycznego występującego w procesie wytwarzania puszki napojowej wynoszący 2,0. Model ten uwzględnia również historię odkształcenia i efekt Bauschingera. Opracowany model lepiej opisuje charakterystykę umocnienia materiału niż pierwotny model dostarczony przez dostawcę blachy. Skutkuje to lepszym odwzorowaniem grubości materiału w procesie symulacji. W przypadku operacji formowania kubka i przetłaczania różnica grubości w stosunku do rzeczywistej grubości zmniejszyła się odpowiednio z 5 do 1 μm i z 11,5 do 0,5 μm . Przedstawiony model umocnienia materiału został wykorzystany w późniejszych symulacjach numerycznych formowania z wykorzystaniem nowego stempla tłoczącego.

Ponieważ proces wytwarzania aluminiowej puszki napojowej składa się nie tylko z etapów formowania stopu aluminium AA3104 H19, ale także z innych pośrednich kroków, w kolejnym etapie prac badawczych skupiono się właśnie na tych elementach procesu. Okazało się etapy, takie jak: mycie i suszenie, nanoszenie warstwy lakieru wewnętrznego oraz litografii zewnętrznej mają również istotny wpływ na materiał z którego produkowana jest puszka, jak również na samą puszkę. Testy wytrzymałościowe próbek wyciętych ze ścianki puszki po etapach formowania korpusu, mycia i suszenia w piecach PIN i IBO wykazały wyraźne obniżenie granicy plastyczności ($R_{0,2}$) oraz wytrzymałości na rozciąganie (R_m). Początkowo przypuszczano, że obniżenie własności mechanicznych aluminium będzie proporcjonalnie odzwierciedlone w wynikach testu ALF oraz testu DRP. Jednakże, tendencja widoczna w wynikach testów wytrzymałościowych próbek ze ścianki puszki pokrywała się tylko do etapu suszenia wewnętrznej warstwy lakieru. Wyniki uzyskane w teście ALF i teście DRP po etapie suszenia w piecu IBO wykazały wyższe wartości niż po suszeniu w piecu PIN i zbliżyły się do poziomu osiąganego dla puszek po formowaniu w prasie poziomej. Warto tutaj jeszcze raz wspomnieć, że próbki do testu wytrzymałościowego wycięte ze ścianki puszki zostały pozbawione wewnętrznego lakieru i zewnętrznej warstwy litografii. Warstwy

te zostały usunięte, aby umożliwić pomiar grubości próbek przed przeprowadzeniem testu rozciągania jednoosiowego. Wówczas nie zakładano, że powłoka wewnętrznej lub zewnętrznej powłoki będzie miała wpływ na wyniki testu wytrzymałościowego. Grubość ścianki aluminiowej puszki wynosi około 100 μm , a wytrzymałość na rozciąganie R_m wynosi około 330 MPa (Rys. 8.3 słupki IBO). Warstwa lakieru ma grubość 5 μm , a jej wytrzymałość na rozciąganie wynosi około 70 MPa (Tabela 8.1). Proste obliczenia sugerują, że wytrzymałość na rozciąganie próbki z powłoką lakieru powinna wzrosnąć o 0,1% w porównaniu do wyników wytrzymałości na rozciąganie próbki bez lakieru. Jednak przeprowadzone eksperymenty wykazują wzrost wartości siły osiągniętej w teście ALF dla puszek o 15% (Rys. 8.5) oraz DRP o +1,8% (Rys. 8.6). W związku z tym wpływ powłoki lakieru nie może zostać wyjaśniony jedynie przez dodanie wytrzymałości na rozciąganie, którą cechuje się lakier. Zjawisko to może być związane z faktem, że cienka warstwa lakieru działa na dużej powierzchni puszki. Podobny efekt ultra-cienkiej powłoki na zachowanie się obiektu w skali makroskopowej zaobserwowano, gdy sztuczna komora serca wykonana z poliuretanu o grubości około 2 mm została pokryta warstwą TiN o grubości 30 nm [69]. W celu potwierdzenia hipotezy o niewspółmiernie dużym wpływie powłoki lakieru na zachowanie mechaniczne puszki, przeprowadzono szereg symulacji metodą elementów skończonych. Obliczenia numeryczne potwierdziły wpływ powłoki lakieru na wyniki uzyskane w testach jakościowych puszki: ALF i DRP. W symulacji testu ALF puszki modelu z warstwą lakieru wewnętrznej wartość uzyskiwanej siły wzrosła o 3,4%, a ciśnienia odwrócenia czaszy denka o 0,85%. Jest to jakościowe potwierdzenie hipotezy, ponieważ obie wartości są znacznie wyższe niż +0,1%, który był szacowany jako proporcjonalny wzrost wytrzymałości puszki pokrytej lakierem. Model numeryczny puszki z lakierem wewnętrznym został opracowany na podstawie uproszczonego założenia, istnienia warstwy lakieru wewnętrznej o stałej grubości 5 μm . W rzeczywistości warstwa lakieru wewnętrznej ma zmienną grubość, co jest rezultatem metody aplikacji lakieru, własności samego lakieru oraz czasu potrzebnego do pełnego utwardzenia. Jednorodna warstwa lakieru wewnętrznej stworzona w modelu numerycznym może być przyczyną różnic obserwowanych w symulacjach testów ALF i DRP puszki, w porównaniu z wynikami testów eksperymentalnych. Uzyskane w drugim etapie prac wyniki pozwoliły na uwzględnienie w modelach numerycznych wpływu temperatury po etapach mycia i aplikacji lakieru. W wyniku ekspozycji na temperaturę 200°C, materiał puszki traci ponad 10% swojej wytrzymałości poprzez zmniejszenie stopnia umocnienia uzyskanego w procesie formowania w prasie poziomej. Wpływ wewnętrznej warstwy lakieru na własności mechaniczne gotowej

puszki jest niewspółmiernie duży w porównaniu do oczekiwanych wartości. Obserwowany eksperymentalnie wpływ wewnętrznej warstwy lakieru na zmianę wyników testu ALF dla puszki wynosił +15% oraz DRP +1,8%. Przewidywany wzrost wytrzymałości na rozciąganie próbki po nałożeniu lakieru wynosił 0,1%, co odpowiada wytrzymałości na rozciąganie warstwy lakieru. Zjawisko obserwowane w eksperymentach zostało potwierdzone wynikami symulacji metodą elementów skończonych oraz uwzględnione w symulacjach procesu zawężania puszki napojowej.

Przeprowadzone badania pozwoliły na stworzenie pełnego modelu numerycznego procesu produkcyjnego puszki napojowej, zaczynając od etapów formowania poprzez uwzględnienie temperatury występującej w procesie oraz wpływu warstwy lakieru wewnętrznego. Dzięki tym modelom możliwa była obserwacja zachowania materiału oraz puszki w trakcie i po procesie formowania, a w szczególności rozkładu grubości jej ścianki. Opracowane modele numeryczne umożliwiły sprawdzenie założonej hipotezy o pewnej objętości materiału w obszarze szyjki puszki, która nie wpływa na jej wytrzymałość i funkcjonalność. Zaproponowano modyfikację stempla tłoczącego prasy poziomej, a poprawność jego działania została sprawdzana wykorzystując symulacje numeryczne procesu. Pozwoliło to na bezkosztowe przeprowadzenie kilku pętli projektowych, w trakcie których dokonywano pewnych modyfikacji pierwotnie wybranego kształtu stempla. Po wprowadzeniu ostatnich poprawek oraz końcowym przetestowaniu stempla w modelu numerycznym procesu formowania aluminiowej puszki napojowej, stworzone zostały rysunki wykonawcze nowego stempla. Firma zewnętrzna zajmująca się produkcją tego typu narzędzi wykonała prototypowy stempel oraz jeden dodatkowy stempel o standardowym kształcie, który służył jako stempel referencyjny. Po opracowaniu końcowego kształtu stempla, jeszcze przed etapem wykonania stempli prototypowych zostało przygotowane zgłoszenie patentowe pt. „Stempel oraz półprodukt i puszka wytworzone przy użyciu tego stempla” w Polskim Urzędzie Patentowym o nadanym numerze P.438791 oraz w procedurze PCT z numerem IB2022/057702.

Etapem finalnym wszystkich prac były testy produkcyjne prototypowego stempla oraz stempla referencyjnego, które potwierdziły założone hipotezy oraz poprawność opracowanych modeli numerycznych. Dzięki opracowanym modelom udało się zminimalizować ilość prototypowych narzędzi do jednej sztuki, co znacząco zmniejszyło koszty jak również skróciło czas wdrażania tego narzędzia. Po wykonaniu testowej produkcji pobrane próbki w postaci puszek zostały poddane badaniom które wykazały, zmniejszenie

wagi pojedynczej puszki o 0,042 gram, bez wpływu na jej wytrzymałość oraz cechy funkcjonalne. Taka zmiana wagi puszki przyniosła efekty w postaci lżejszego opakowania jak również zmniejszyła materiałochłonności procesu produkcyjnego. Dla średniej dobowej produkcji wynoszącej około 3 mln sztuk puszek, redukcja ilości wykorzystanego do jej produkcji materiału będzie sięgać około 126 kg aluminium, czyli w skali roku będzie to dla jednej linii około 44,1. W przypadku produkcji pierwotnego aluminium przekłada się to na zmniejszenie emisji CO₂ nawet o 651 ton.

Bibliografia

- [1] J. Cao and M. Banu, "Opportunities and Challenges in Metal Forming for Lightweighting: Review and Future Work," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 142, no. 11, Sep. 2020, doi: 10.1115/1.4047732.
- [2] S. Ghnimi, A. Nikkhah, J. Dewulf, and S. Van Haute, "Life cycle assessment and energy comparison of aseptic ohmic heating and appertization of chopped tomatoes with juice," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 13041, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-92211-1.
- [3] M. SODEIK, K. TÄl;FFNER, and F. WEBER, "Fundamentals of Modern Can Making and Materials Development for Three-piece Can Manufacturing," *Trans. Iron Steel Inst. Japan*, vol. 28, no. 8, pp. 663–671, 1988, doi: 10.2355/isijinternational1966.28.663.
- [4] P. Wędrychowicz, P. Kustra, M. Paćko, and A. Milenin, "A Flow Stress Model of the AA3104-H19 Alloy for the FEM Simulation of the Beverage Can Manufacturing Process under Large Plastic Deformations," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216408.
- [5] W. Baran, K. Regulski, and A. Milenin, "Influence of Materials Parameters of the Coil Sheet on the Formation of Defects during the Manufacture of Deep-Drawn Cups," *Processes*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/pr10030578.
- [6] J. Courbon, "Mechanical Metallurgy of Aluminium Alloys for the Beverage Can," *Mater. Sci. Forum*, vol. 331–337, pp. 17–30, 2000, doi:

10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.17.

- [7] D. Brough and H. Jouhara, “The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery,” *Int. J. Thermofluids*, vol. 1–2, p. 100007, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>.
- [8] A. R. Hind, S. K. Bhargava, and S. C. Grocott, “The surface chemistry of Bayer process solids: a review,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 146, no. 1, pp. 359–374, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00798-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00798-5).
- [9] S. Prasad, “Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process,” *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 11, 2000, doi: 10.1590/S0103-50532000000300008.
- [10] J. Nam and K. S. Han, “Finite Element Analysis of Deep Drawing and Ironing Process in the Steel D & I Canmaking,” *ISIJ Int.*, vol. 40, no. 12, pp. 1223–1229, 2000.
- [11] P. Mandin, R. Wüthrich, and H. Roustan, “Industrial Aluminium Production: the Hall-Heroult Process Modelling,” *ECS Trans.*, vol. 19, Oct. 2009, doi: 10.1149/1.3247986.
- [12] L. A. Dobrzański, *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [13] B. T. Bergeson and M. Reiling, *Two Piece Beverage Canmaking*. Sayers Publishing Group, 2002.
- [14] L. F. Folle, S. E. Silveira Netto, and L. Schaeffer, “Analysis of the manufacturing process of beverage cans using aluminum alloy,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 205, no. 1–3, pp. 347–352, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.11.249.
- [15] A. Andrianov, E. G. Kandalova, E. V. Aryshensky, and A. F. Grechnikova, “Influence of 3104 Alloy Microstructure on Sheet Performance in Ironing Aluminum Beverage Cans,” *Key Eng. Mater.*, vol. 684, pp. 398–405, 2016.
- [16] A. L. T. Martins, A. A. Couto, N. B. de Lima, and G. F. C. Almeida, “Crystallographic texture evolution of aluminum alloy 3104 in the drawn and wall ironing (DWI) process,” *Mater. Res.*, vol. 22, 2020.
- [17] S. Papadopoulou, V. Loukadakis, Z. Zacharopoulos, and S. Papaefthymiou, “Influence

- of Uniaxial Deformation on Texture Evolution and Anisotropy of 3104 Al Sheet with Different Initial Microstructure,” *Metals (Basel)*., vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/met11111729.
- [18] W. F. Hosford and J. L. Duncan, “The Aluminum Beverage Can,” *Sci. Am.*, vol. 271, no. 3, pp. 48–53, Jun. 1994, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/24942835>
- [19] P. Kokoszka and A. Milenin, “The Impact of Temperature Conditions on the Manufacturing Process and Mechanical Behavior of Beverage Can Ends during Operation,” *Materials*, vol. 16, no. 18. 2023. doi: 10.3390/ma16186137.
- [20] N. Chamakos *et al.*, “Towards the Efficient Recycling of Used Beverage Cans: Numerical Study and Experimental Validation BT - Light Metals 2023,” S. Broek, Ed., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 942–948.
- [21] K. A. AlSaffar and L. M. H. Bdeir, “Recycling of aluminum beverage cans,” *J. Eng. Sustain. Dev.*, vol. 12, no. 3, pp. 157–163, 2008.
- [22] R. Stewart, M. Niero, K. Murdock, and S. I. Olsen, “Exploring the Implementation of a Circular Economy Strategy: The Case of a Closed-loop Supply of Aluminum Beverage Cans,” *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 810–815, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.006>.
- [23] M. Colgan and J. Monaghan, “Deep drawing process: analysis and experiment,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1, pp. 35–41, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00253-4).
- [24] D.-F. Chang and J. E. Wang, “Analysis of draw–redraw processes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 40, no. 8, pp. 793–804, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00125-2).
- [25] B.-A. Behrens, O. Pösse, M. Milch, and G. Helms, “Optimization of ironing processes by means of DOE and FEA,” *Prod. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–8, 2007, doi: 10.1007/s11740-007-0023-y.
- [26] H. Utsunomiya and H. Nishimura, “Effect of base profile of a DI beverage can and material properties on the dome reversal pressure,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 97, no. 1, pp. 54–60, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00286-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00286-1).
- [27] A. Rękas, T. Latos, R. Budzyn, M. Fijałkowski, and Ł. Brodawka, “The analysis of

- influence of sheet properties on the ironing process of thin-walled cylindrical shell products from aluminum alloys,” *Key Eng. Mater.*, vol. 641, pp. 232–245, 2015.
- [28] K. Yaqoob, F. Hashmi, and W. Hassan Tanveer, “Failure analysis of cartridge brass shell,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 138, p. 106325, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106325>.
- [29] X. Zhang and T. Wierzbicki, “Characterization of plasticity and fracture of shell casing of lithium-ion cylindrical battery,” *J. Power Sources*, vol. 280, pp. 47–56, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.077>.
- [30] R. Padmanabhan, M. C. Oliveira, J. L. Alves, and L. F. Menezes, “Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 43, no. 14, pp. 1062–1067, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.011>.
- [31] Z. Marciniak and J. L. Duncan, “The mechanics of sheet metal forming,” 1992.
- [32] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.pl/books?id=x0GWAd7hNy0C>
- [33] G. Park, R. Park, H. Kwak, and C. Kim, “Design of a Combined Redrawing-Ironing Process to Manufacture a CNG Pressure Vessel Liner,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 18, 2021, doi: 10.3390/app11188295.
- [34] A. Orsolini and J. Booker, “Modelling capabilities required for the double nosing process in the assembly of spherical plain bearings,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, pp. 930–940, May 2012, doi: 10.1177/0954405411434679.
- [35] Y. Guo, C. Xu, J. Han, and Z. Wang, “New technique of precision necking for long tubes with variable wall thickness,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 622–630, 2020, doi: 10.1007/s11465-019-0565-7.
- [36] C.-C. Chang and S.-S. Huang, “Study on micro nosing process assisted by ultrasonic vibration,” *MATEC Web Conf.*, vol. 185, p. 5, Jan. 2018, doi: 10.1051/matecconf/201818500005.
- [37] J. J. Sheu and H.-H. Su, “Cold nosing process modeling and simulation for manufacturing of aluminium conical milk can,” *2009 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, pp. 2319–2323, 2009.

- [38] C. C. Chang, S. K. Pan, and K. Te Yu, "Forming Limit in the Nosing Process of Micro Copper Cups," *Key Eng. Mater.*, vol. 794, pp. 121–126, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.794.121.
- [39] B. P. P. Gouveia, M. L. Alves, P. A. R. Rosa, and P. A. F. Martins, "Compression beading and nosing of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation," *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 3, no. 1, pp. 7–16, 2006, doi: 10.1007/s10999-006-9009-8.
- [40] X. Li, X. Xu, K. Wei, Y. Fan, L. Wei, and Z. Qui, "Effect of temperature and friction on necking and thickening for 5A02 aluminum alloy thin-walled tube in differential temperature extrusion," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 108, no. 3, pp. 683–694, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05465-w.
- [41] Y.-H. Lu, "Study of preform and loading rate in the tube nosing process by spherical die," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 194, no. 25, pp. 2839–2858, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.07.032>.
- [42] D. Wodka, "Sposób i urządzenie do odzyskiwania chłodziwa," PL239599B1, 2018 [Online]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/067844616/publication/PL239599B1?q=pn%3DPL239599B1>
- [43] M. W. Kendig and R. G. Buchheit, "Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings," *Corrosion*, vol. 59, no. 5, pp. 379–400, 2003.
- [44] P. Deneuve and R. Lecot, "The study of friction in ironing process by physical and numerical modelling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 45, no. 1–4, pp. 625–630, Sep. 1994, doi: 10.1016/0924-0136(94)90409-X.
- [45] S. S. Tufekci, M. A. Ahmetoglu, G. Kinzel, and T. Altan, "Process simulation for can manufacturing by deep drawing and ironing," *SAE Trans.*, vol. 104, pp. 532–540, May 1995.
- [46] H. Aretz and O. Engler, "Accuracy analysis of earing compensation procedures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 191–192, pp. 418–433, May 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.01.007.

- [47] M. Khan *et al.*, “An analysis of dome reversal in metal beverage container based on finite element methods,” *Struct. Durab. Heal. Monit.*, vol. 6, no. 2, pp. 53–68, 2010, doi: 10.3970/sdhm.2010.006.053.
- [48] R. Paul, “Draw die and method for manufacturing a metal cup,” WO/2017/220963, 2017
- [49] M. Schünemann, M. A. Ahmetoglu, and T. Altan, “Prediction of process conditions in drawing and ironing of cans,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 59, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 1–9, May 1996, doi: 10.1016/0924-0136(96)02280-7.
- [50] W. M. van Haaften, B. Magnin, W. H. Kool, and L. Katgerman, “Constitutive behavior of as-cast AA1050, AA3104, and AA5182,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 33, no. 7, pp. 1971–1980, 2002, doi: 10.1007/s11661-002-0030-8.
- [51] S. M. Mirfalah-Nasiri, A. Basti, and R. Hashemi, “Forming limit curves analysis of aluminum alloy considering the through-thickness normal stress, anisotropic yield functions and strain rate,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 117, pp. 93–101, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.08.011.
- [52] F. Sun, P. Liu, and W. Liu, “Multi-level deep drawing simulations of AA3104 aluminium alloy using crystal plasticity finite element modelling and phenomenological yield function,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 3, p. 16878140211001204, Mar. 2021, doi: 10.1177/16878140211001203.
- [53] R. E. Dick, Y. Lou, S. Zhang, and J. Yoon, “Material characterization and fracture prediction with advanced constitutive model and Polar EPS fracture diagram for AA 3104-H19,” 2018.
- [54] G. Q. Zhang, J. Q. Zhai, T. Hao, W. J. Wang, X. B. Yang, and Y. J. Liu, “Forming process numerical simulation of beverage can,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 753–755, pp. 928–931, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.928.
- [55] A. Kolhatkar, V. Karthik, G. Chaitanya, A. Kumar, and D. Ramchandran, “Development and validation of a miniature tensile specimen for determination of mechanical properties,” *J. Test. Eval.*, vol. 47, no. 5, pp. 3417–3431, Sep. 2019, doi: 10.1520/JTE20180294.
- [56] H. Farrukh, M. N. Desmukh, H. Asif, and D. K. Sehgal, “Miniature test technique for

- acquiring true stress–strain curves for a large range of strains using a tensile test and inverse finite element method,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 110–116, pp. 4204–4211, Oct. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.4204.
- [57] K. Kumar *et al.*, “Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, Jan. 2014, pp. 899–909. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.112.
- [58] L. Bergonzi, M. Vettori, and A. Pirondi, “Development of a miniaturized specimen to perform uniaxial tensile tests on high performance materials,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., Jan. 2019, pp. 213–224. doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.018.
- [59] A. Milenin, P. Kustra, and M. Paćko, “Mathematical model of warm drawing of MgCa0.8 alloy accounting for ductility of the material,” *Comput. Methods Mater. Sci.*, vol. 10, pp. 69–79, 2010.
- [60] A. Hansel and T. Spittel, *Kraft- und arbeitsbedarf bildsamer formgebungsverfahren*. Lipsk(Germany): VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [61] J. L. Duval, C. Teodosiu, and J. Courbon, “Microstructure-based models of the plastic behaviour of 3104 aluminium alloy,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 217–222, pp. 1007–1012, 1996, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.217-222.1007.
- [62] X. Guo, Y. Gu, H. Wang, K. Jin, and J. Tao, “The Bauschinger effect and mechanical properties of AA5754 aluminum alloy in incremental forming process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1, pp. 1387–1396, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0965-y.
- [63] A. S. Korhonen, “On the Work-Hardening of AA 3104-H19 Aluminum Alloy,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, no. 2, pp. 505–511, 2013, doi: 10.1007/s11665-012-0299-8.
- [64] K. Kang, “Impact of die wear and punch surface textures on aluminium can wall,” *Wear*, vol. 266, no. 9–10, pp. 1044–1049, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.WEAR.2009.01.009.
- [65] J. Courbon, “Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans,” *Scr. Mater.*, vol. 48, no. 11, pp. 1519–1524, Jun. 2003, doi: 10.1016/S1359-6462(03)00131-3.

- [66] E. V Aryshenskii, L. V Zhuravel, V. Y. Aryshenskii, and E. D. Beglov, “Effect of softening on the mechanical properties and formability of ribbon from alloy 3104,” *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 56, no. 1, pp. 14–17, 2014.
- [67] A. Kokoszka Paweł and Milenin, “The influence of aging on buckle strength loss in AA5182-H48 for beverage can ends,” *Comput. Methods Mater. Sci.*, vol. 23, 2023, doi: <https://doi.org/10.7494/cmms.2023.3.0815>.
- [68] V. Hegadekatte and Y. Shi, “Buckling of beverage cans under axial loading,” in *Simulia India Regional Users Meeting*, 2011, pp. 1–16.
- [69] M. Kopernik, M. Gawlikowski, A. Milenin, I. Altyntsev, R. Kustos, and S. Kac, “Digital image correlation of coated and uncoated Religa Heart_Ext ventricular assist device,” *Acta Bioeng. Biomech.*, vol. 17, no. 4, 2015.
- [70] “LS DYNA keyword user’s manual.”
- [71] A. Mackey, “Numerical analysis of the effect of orthogonal friction and work piece misalignment during an AA5042 cud drawing process,” in *14th International LS-DYNA User Conference*, Alcoa Technical Center, PA, 2016, pp. 1–13.
- [72] A. Jordan-Cordera and J. C. Miranda-Valenzuela, “Simulation and Analysis of the Beverage Can Necking Process Using LS-DYNA,” in *8th International LS-DYNA Users Conference*, 2004.