

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW

PRACA DOKTORSKA

Tytuł: Teoretyczno – doświadczalna analiza wytwarzania rur w procesie bezkielichowego walcowania metodą pielgrzymową

Autor: Mgr inż. Jesica Biś

Promotor: Dr hab. inż. Bartosz Koczurkiewicz, prof. PCz

Częstochowa 2024

Spis treści

1.	Wprowadzenie	4
2.	Metody produkcji rur bez szwu	7
2.1	Wytwarzanie grubościennych tulei rurowych w skośnych walcarkach dziurujących	7
2.1.1	Walcowanie tulei w walcarce skośnej - Mannesmann	8
2.1.2	Walcowanie tulei w walcarce skośnej - Stiefela	10
2.1.3	Walcowanie tulei w walcarce skośnej dwuwalcowej - Dieschera	11
2.1.4	Walcowanie tulei w walcarce skośnej trójwalcowej Assela	12
2.2	Wytwarzanie grubościennych tulei rurowych w prasach	14
2.3	Wyciskanie tulei grubościennych	17
2.4	Walcowanie tulei rurowych w skośnych walcarkach wydłużających	18
2.5	Walcownie rur w walcowniach ciągłych	22
2.6	Ciągnięcie rur	24
2.7	Walcowanie rur na ławie przepychowej	27
2.8	Wytwarzanie rur stalowych w walcowni pielgrzymowej	31
2.8.1	Walcarka pielgrzymowa	33
2.9	Podsumowanie rozważań teoretycznych	37
3.	Teza i cel pracy	39
4.	Badania własne	42
4.1	Analiza rzeczywistego procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową	42
4.1.1	Określenie parametrów technologicznych wyciskania na prasie wlewka kwadratowego	43
4.1.2	Określenie parametrów technologicznych walcowania w skośnej walcarce wydłużającej	46
4.1.3	Określenie parametrów technologicznych walcowania rur w walcarce pielgrzymowej	49

5.	Badania numeryczne	53
5.1	Przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową	56
5.2	Budowa modeli geometrycznych	57
5.3	Metodyka prowadzonych badań numerycznych	64
5.3.1	Określenie parametrów symulacji	66
5.3.2	Przebijanie na prasie przebijającej	67
5.3.3	Dziurowanie z wydłużaniem w skośnej walcarce wydłużającej.....	71
5.3.4	Wydłużanie w walcarce pielgrzymowej.....	77
5.4	Proces bezkielichowego wytwarzania rur metodą pielgrzymową	81
6.	Podsumowanie i wnioski	101
7.	Spis rysunków	103
8.	Literatura.....	107

1. Wprowadzenie

W branży przemysłowej dąży się do otrzymywania wyrobów najwyższej jakości, przy niskich kosztach produkcji. Powoduje to konieczność poszukiwania rozwiązań umożliwiających modyfikację istniejących lub opracowanie nowych technologii. Wymogi rynku oraz ciągły postęp technologiczny wymuszają unowocześnianie technologii pod kątem minimalizacji ilości wad i niezgodności wyrobu oraz zmniejszenia kosztocłonności procesów.

Rury stalowe są niezmiennie od wielu lat jednym z podstawowych wyrobów konstrukcyjnych oraz są stosowane na szeroką skalę w przemyśle. Na rynku nadal obserwowane jest duże zapotrzebowanie na ten asortyment. W tabeli 1 zostały przedstawione dane statystyczne opracowane na podstawie Polskiej Klasyfikacji Wyrobów i Usług dotyczące wytworzonej produkcji rur stalowych z podziałem na miesiące 2023 roku z uwzględnieniem rur ze szwem i bezszwowych.

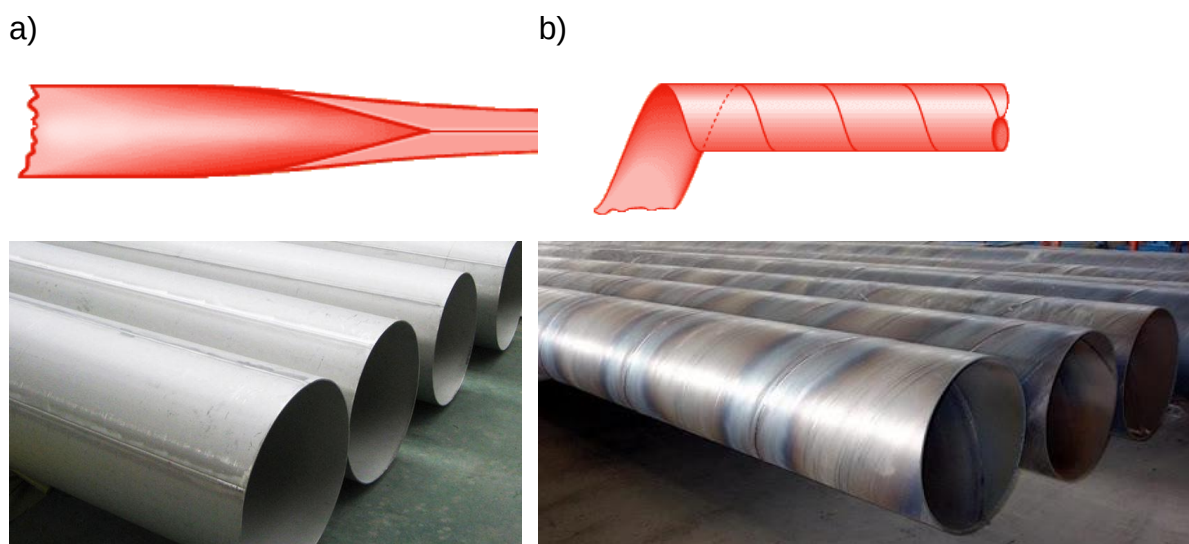
Tabela 1. Produkcja rur stalowych w poszczególnych miesiącach 2023 roku [26]

	J.m.	Rok	Miesiąc												Razem
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Rury stalowe	tys. t	2023	68,9	81,9	91,7	79,9	75,7	68,4	64,6	69,6	74,5	78,6	73,2	57,0	884
w tym:															
Rury stalowe bez szwu	tys. t	2023	7,9	8,7	9,7	7,8	7,9	6,4	5,7	5,5	6,2	6,2	5,3	4,3	81,5
Rury stalowe ze szwem	tys. t	2023	61,0	73,2	82,0	72,2	67,7	62,0	58,9	64,1	68,3	72,5	67,8	52,7	803

Mimo, iż rury bezszwowe stanowią niecałe 10% całej produkcji rur stalowych to funkcjonowanie niektórych obszarów przemysłu bez ich zastosowania byłoby niemożliwe. Do tych obszarów należą: przemysł budowlany, przemysł wiertniczy i wydobywczy, przemysł energetyczny, przemysł samochodowy i maszynowy, górnictwo oraz transport. Mogą być klasyfikowane według różnych kryteriów, np. przekrój poprzeczny, grubość ścianki, rodzaj pokrycia powierzchni czy okładziny ochronnej. Najczęściej jednak główny ich podział związany jest z techniką wytwarzania, według którego rozróżnia się rury ze szwem i bez szwu.

Technologia wytwarzania rur ze szwem została opracowana w 1825 roku i polegała na zwinięciu arkusza taśmy lub stalowej blachy w rulon, a następnie łączeniu

w miejscu styku za pomocą specjalnego szwu wzdłużnego lub spiralnego. Zaletą tej metody wytwarzania jest wszechstronność, możliwości uzyskania szerokiego zakresu średnic, a także atrakcyjna cena. Wyroby tak wytworzone znajdują zastosowanie przede wszystkim do budowy sieci przemysłowych. Na rysunku 1 przedstawiono przykłady rur ze szwem wzdłużnym (rys. 1a) i spiralnym (rys. Rysunek 1b) [122, 123, 127].



Rysunek 1. Przykład rury ze szwem: a) wzdłużnym, b) spiralnym [127]

Rury bez szwu po raz pierwszy zostały wyprodukowane w 1890 roku z wlewka. W wyniku dziurowania powstała jednolita grubościenna tuleja, nie posiadająca żadnych połączeń, która następnie była walcowana na gorąco, w celu ukształtowania średnicy i żądanej grubości ścianki. Są one bardziej wytrzymałe w porównaniu do rur ze szwem, a ryzyko nieszczelności wynikające z uszkodzeń lub nieciągłości szwu podczas ich pracy np. jako rurociągi jest znikome.

Ze względu na swoje zalety rury bezszwowe znajdują zastosowanie przede wszystkim przy budowie instalacji gazowych, hydrauliczno-grzewczych czy wodnych. Popularne także jest stosowanie ich na elementy konstrukcji m.in. hal, magazynów, obiektów przemysłowych, mostów, wiaduktów oraz innych składowych infrastruktury drogowej, np. bramownice, latarnie, a także do budowy masztów telekomunikacyjnych, słupów wysokiego napięcia oraz innych elementów sieci przesyłowych. Są stosowane jako elementy do budowy kotłów, wymienników ciepła, a także znajdują zastosowanie przy wykonywaniu przewiertów, przepustów, oporów mostowych, ochrony wykopów i wzmacniania gruntów.

W pracy skoncentrowano się na technice wytwarzania rur bez szwu metodą pielgrzymową, która od dziesięcioleci nie była modernizowana. Na podstawie analizy zgromadzonych materiałów teoretycznych i doświadczeń własnych zaproponowano modyfikację tej metody, umożliwiającą uzyskanie wyrobu charakteryzującego się większym uzyskiem a wytworzona rura jest dłuższa od wytwarzanej według obecnie stosowanej technologii. Efekt ten osiągnięto poprzez zastosowanie bezkielichowego walcowania metodą pielgrzymową.

2. Metody produkcji rur bez szwu

Rury stalowe bez szwu produkowane są najczęściej z wlewka lub kęsiska w dwóch technologiach. Pierwsza polega na wytworzeniu grubościennej tulei z dnem lub bez dna, którą można otrzymać w skośnych walcarkach dziurujących lub w prasach, z następnym ich wydłużaniem, a druga na bezpośrednim walcowaniu z wlewka w walcarkach dziurujących. Kończącym etapem każdej z metod jest walcowanie redukcyjne i wykańczające.

2.1 Wytwarzanie grubościennych tulei rurowych w skośnych walcarkach dziurujących

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów otrzymywania tulei do produkcji rur bezszwowych jest walcowanie skośne. Walcarki skośne dziurujące stanowią podstawowe urządzenie w układzie technologicznym walcowni rur bez szwu. To w nich dokonywane jest dziurowanie na gorąco wsadu o przekroju okrągłym na grubościenną tuleję i jednocześnie jej wydłużanie, a kształt rury otrzymywany jest podczas odkształcania plastycznego materiału między obracającymi się i współpracującymi ze sobą walcami.

Na przestrzeni lat nastąpiła modernizacja procesu walcowania rur, która dotyczyła m.in. zmian w kształcie, ilości i ustawieniu walców względem osi poziomej oraz w sposobach prowadzenia metalu w strefie odkształcenia, możliwym do osiągnięcia w procesie dziurowania [2, 35, 72, 78, 80, 112]

W literaturze ma to odzwierciedlenie w mnogości rozwiązań, których geometryczna strefa odkształcenia praktycznie jest taka sama, ale odkształcenie realizowane jest w oparciu o narzędzia (walce, tarcze) o różnym kształcie.

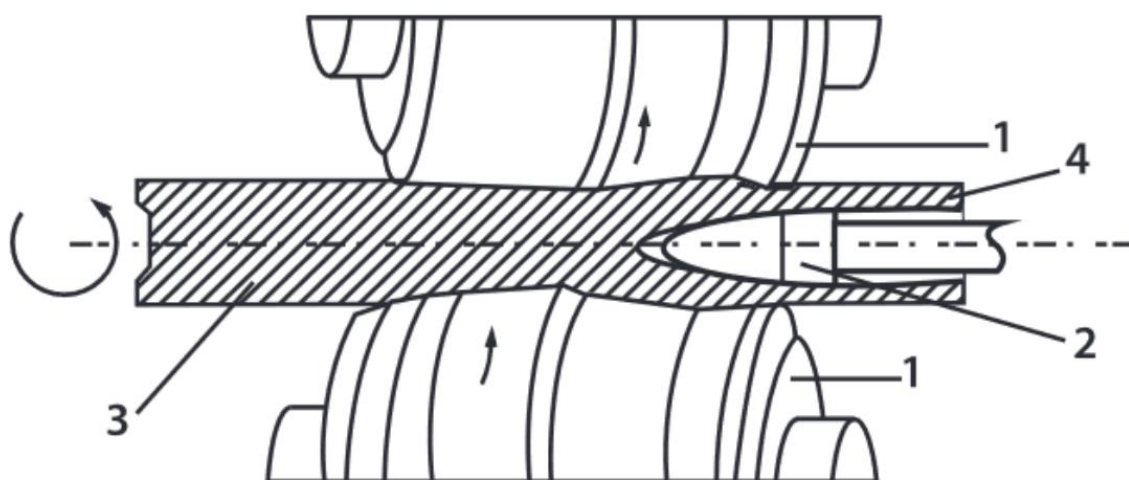
Rozróżnić można skośne walcarki dziurujące dwuwalcowe składające się z dwóch walców roboczych i dwóch prowadnic, które podtrzymują tuleję wzdłuż osi walcowania oraz trójwalcowe składające się tylko z walców roboczych (nie zawierająca prowadnic). W literaturze [75] przedstawiono następujący podział urządzeń do dziurowania i walcowania tulei:

- dwuwalcowe:
 - Mannesmanna z prowadnicami rolkowymi,
 - Stiefela z prowadnicami płaskimi,
 - Dischera z prowadnicami tarczowymi,

- trójwalcowa Assela.

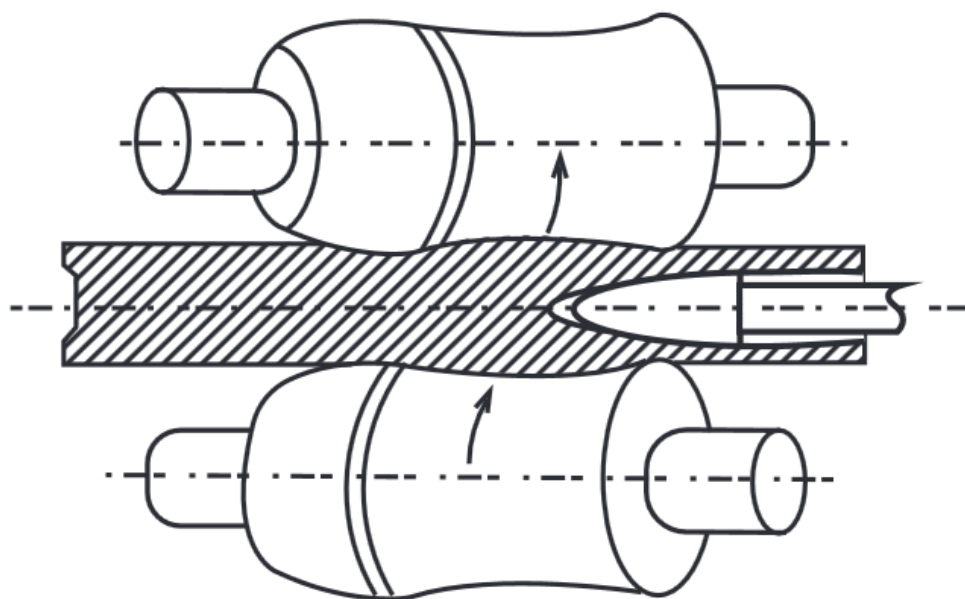
2.1.1 Walcowanie tulei w walcarce skośnej - Mannesmanna

Walcarka skośna Mannesmanna składa się z dwóch prowadnic rolkowych, których zadaniem jest tylko podtrzymywanie walcowanej tulei zgodnie z osią walcowania, a walcowanie prowadzone jest w dwóch walcach o zmiennym profilu obracających się w tym samym kierunku (rys. 2), których osie są ustawione względem siebie pod kątem rozwałcowania $3 \div 6^\circ$, co pomaga zintensyfikować odkształcenie i umożliwia dziurowanie wlewka. Walcowanie tulei odbywa się w kilku etapach [114]. W pierwszym następuje chwyt na progu walca i stopniowa redukcja średnicy zewnętrznej, która wprowadza schemat naprężeń i odkształceń inicjujący pękanie materiału w osi, który dodatkowo jest poddawany działaniu sił rozrywających wywołanych przez główkę dziurującą zamocowaną na trzpieniu znajdującą się wewnątrz tulei. Drugi to rozwałcowanie ścianki tulei przez walce od strony wewnętrznej na trzpieniu przy jednoczesnym kształtowaniu średnicy zewnętrznej, a w ostatnim następuje wygładzenie tulei na wyjściu z walców [36].



Rysunek 2. Schemat procesu walcowania tulei rurowej w walcarce skośnej dwuwalcowej Mannesmanna z walcami beczkowatymi i prowadnicami rolkowymi; oznaczenia: 1- walce robocze, 2 - główka dziurująca, 3 - wsad, 4 - tuleja rurowa [36].

W miarę upływu lat metoda ta była unowocześniana i modyfikowana, a główne zmiany obejmowały profil walców. Na rysunku 3 przedstawiono schemat procesu dziurowania w walcarce skośnej Mannesmanna o zmodyfikowanym kształcie beczki.

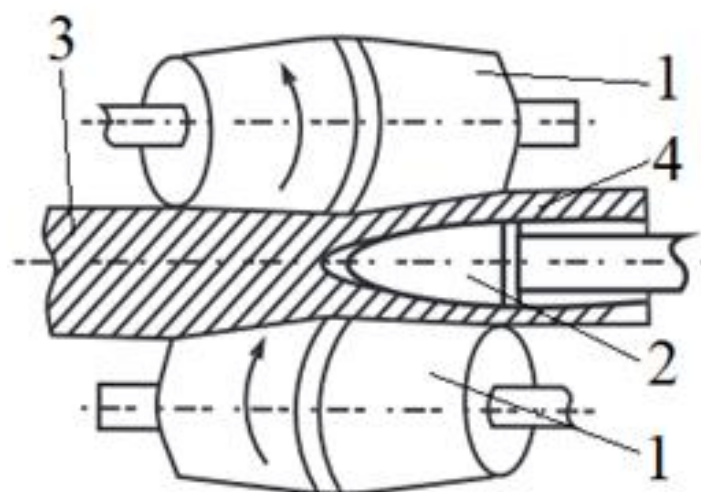


Rysunek 3. Zmieniony kształt walców Mannesmanna podczas walcowania skośnego [114]

W walcarce okrągły wsad stopniowo odkształca się na całym obwodzie. Podczas jego przemieszczania prześwit między walcami, ze względu na ich zbieżność, stopniowo się zmniejsza przy równoczesnym wzroście ich prędkości obwodowej w miarę postępu walcowania. Zastosowane prowadnice rolkowe umożliwiają równoległe przemieszczanie się wsadu względem osi walcowania. W miarę przesuwania się wlewka nacisk metalu na walce wzrasta, następuje płynięcie wierzchnich jego warstw. Największemu wydłużeniu ulegają jego brzegi. Dzięki temu na początku wsadu tworzy się wklęsłość, która pod wpływem stopniowego naciągania wlewka na trzpień przechodzi w wydrążenie, co z kolei powoduje naruszenie spójności i inicjuje samoistne rozrywanie się materiałów w strefie intensywnego odkształcenia umożliwiając wprowadzenie główki do wnętrza. Poprzez odpowiedni dobór parametrów technologicznych można zminimalizować ilość występujących wad, ale nie ma możliwości ich całkowitej eliminacji. Wadą wynikającą z tego zjawiska jest powstawanie zawałców i łusek na wewnętrznej powierzchni tulei rurowej [9, 22, 39, 107, 114].

2.1.2 Walcowanie tulei w walcarce skośnej - Stiefela

Innym sposobem na osiągnięcie stanu naprężeń i odkształceń ułatwiającym wprowadzenie trzpienia podczas wytwarzania rur bezszwowych w skośnych walcarkach dziurujących jest walcowanie metodą Stiefela, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.

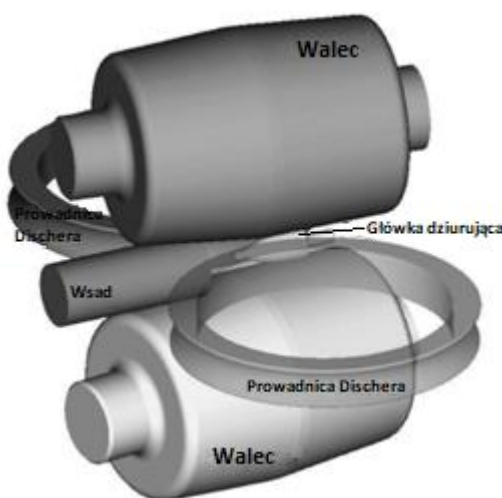


Rysunek 4. Schemat procesu walcowania tulei rurowej w walcarce skośnej dwuwalcowej Stiefela z walcami beczkowatymi i prowadnicami stałymi; oznaczenia: 1- walce robocze, 2 - główka dziurująca, 3 - wsad, 4 - tuleja rurowa [36]

W porównaniu do mannesmannowskiego rozwiązania, Stiefel ulepszył konstrukcję walcarek, m.in. poprzez zmniejszenie prześwitu w części wykroju poprzez zmianę odległości między prowadnicami. W ten sposób otrzymano wykrój bardziej zamknięty. Jednak w wyniku dużego tarcia następowało przespieszone zużycie prowadnic i występowało większe prawdopodobieństwo zakleszczenia się wsadu. Miało to znaczący wpływ na efektywność procesu i jakość otrzymanego wyrobu. Konstrukcja walców wprowadziła mniejsze naprężenia ściskające oraz zwiększyła żywotność walców [36].

2.1.3 Walcowanie tulei w walcarce skośnej dwuwalcowej - Dieschera

System Dieschera obejmuje walcarkę skośną dwuwalcową wyposażoną w obrotowe prowadnice tarczowe (rys. 5). Walce o kształcie beczkowatym wraz z prowadnicami tarczowymi tworzą zamknięty wykrój. Proces walcowania rury według tej technologii polega na podaniu tulei wykonanej w walcarce dziurującej Mannesmanna najpierw do urządzenia, które wciska do jej środka trzpień, a następnie do walcarki Dieschera, która walcuje ją na rurę. Walcowana rura wykonuje ruch posuwisty i jednocześnie obraca się wokół własnej osi na trzpieniu umieszczonym w jej środku. Dopelnieniem wykroju są odpowiednio skalibrowane prowadnice w kształcie walców tarczowych, które w czasie trwania procesu utrzymują wsad równoległy do osi walcowania, zwiększając tarcie i zmniejszając możliwości owalizacji oraz wypłynięcia metalu ze strefy odkształcenia [36].



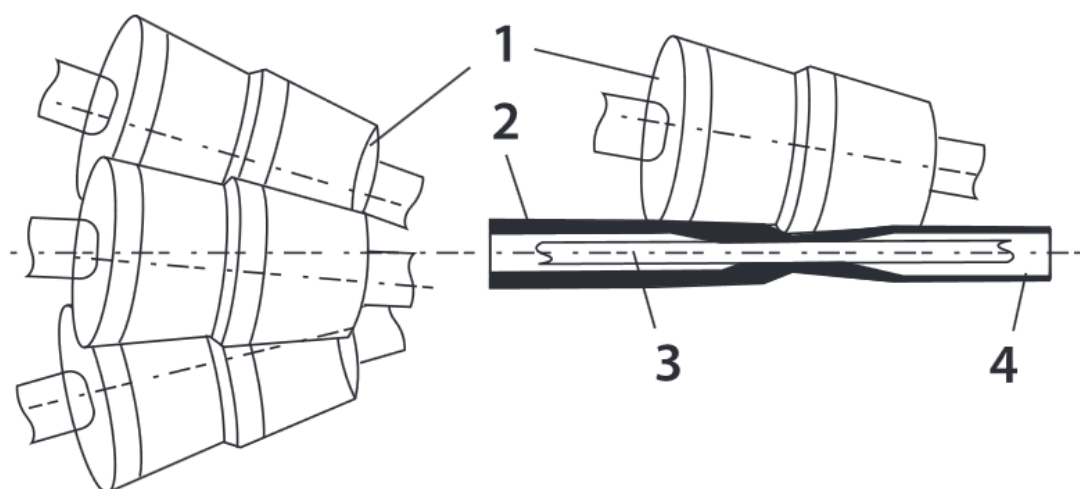
Rysunek 5. Schemat walcarki skośnej z prowadnicami tarczowymi Dieschera [38]

Zastosowane prowadnice tarczowe Dieschera przyczyniły się do skrócenia czasu dziurowania. Spowodowało to także zwiększenie zdolności produkcyjnej walcarek, m.in. możliwość wytworzenia tulei cienkościennych. Natomiast zwiększona siła tarcia negatywnie wpływa na żywotność samych prowadnic, co powoduje znaczne obniżenie wydajności walcarki i powstawanie wad w tulejach. Wprowadzone ulepszenie w postaci zastosowania prowadnic tarczowych Dieschera wyeliminowało problem zakleszczania się wsadu między walcami.

2.1.4 Walcowanie tulei w walcарce skośnej trójwalcowej Assela

Kolejnym sposobem wytwarzania rur bez szwu jest ich produkcja w walcarkach skośnych trójwalcowych. Grubościenne tuleja wprowadzana jest na gładkim, swobodnym trzpieniu pomiędzy trzy walce o zmiennym przekroju obracające się w jednakowym kierunku. Wskutek ukosowania osi walców względem kierunku walcowania, prędkość obwodowa walców ma składową równoległą do osi walcowania. Skutkiem jest wciąganie materiału między obracające się walce i przemieszczanie się tulei wzdłuż walców ruchem śrubowym. Odształcenie ścianki tulei zachodzi pomiędzy wewnętrznym trzpieniem a walcem [97, 100].

Zmianę wymiarów walcowanych rur uzyskać można w pewnym zakresie przez dosunięcie lub odsunięcie walców, ewentualnie przez ich wymianę na zestaw o innych średnicach roboczych. Podstawową zaletą trójwalcowych walcarek skośnych jest wyrównanie grubości ścianki na obwodzie i osiągnięcie wysokiej dokładności wymiarowej rur. Na rysunku 6 przedstawiono profil i ustawienie walców w skośnej walcарce trójwalcowej Assela.

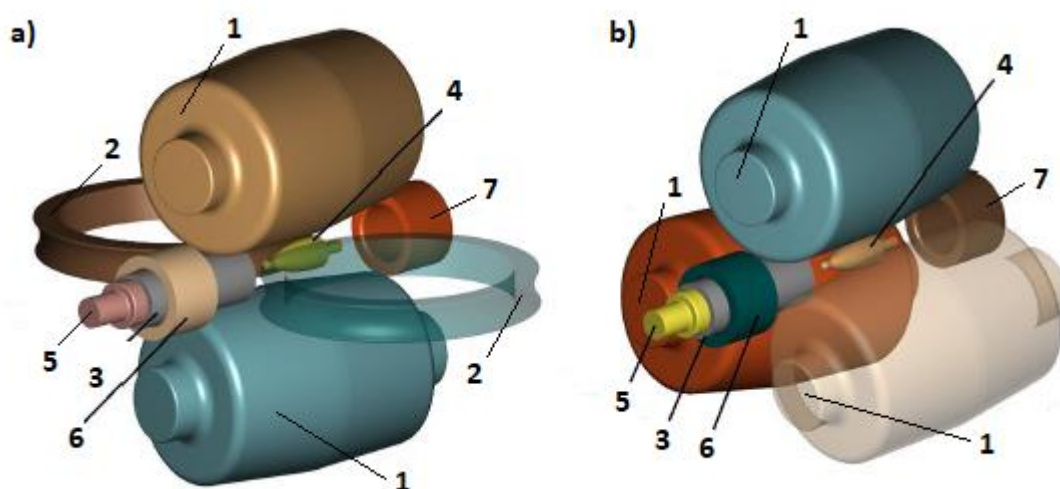


Rysunek 6. Walcarka skośna trójwalcowa Assela, 1 – walce robocze, 2 – tuleja, 3 – trzpień z główką dziurującą, 4 – tuleja [114]

W porównaniu do układów dwuwalcowych, występujący korzystny stan naprężeń w układzie trójwalcowym umożliwia produkcję tulei rurowych o grubszej ściance i lepszej jakości powierzchni, natomiast trudności sprawia otrzymanie cienkościennej tulei, z uwagi na „uciekający” materiał w szczeliny między walcami i tworzenie się na końcu kielichów. Porównanie wpływu parametrów technologicznych

na wyrób i sam proces walcowania w skośnych walcarkach dwu - i trójwalcowych zostało przedstawione w pracach [6, 34, 37, 39, 55], w których szczegółowo opisano istniejące stany naprężeń, parametry kinematyczne i siłowe oraz jakość wytworzonej tulei rurowej.

Konstrukcja dwuwalcowych walcarek znacznie różni się od trójwalcowych. Jedną z głównych różnic jest zastosowanie prowadnic tarczowych w walcarkach dwuwalcowych. Schemat rozmieszczenia narzędzi w skośnej walcarce dziurującej dwuwalcowej i trójwalcowej został przedstawiony na rysunku 7.

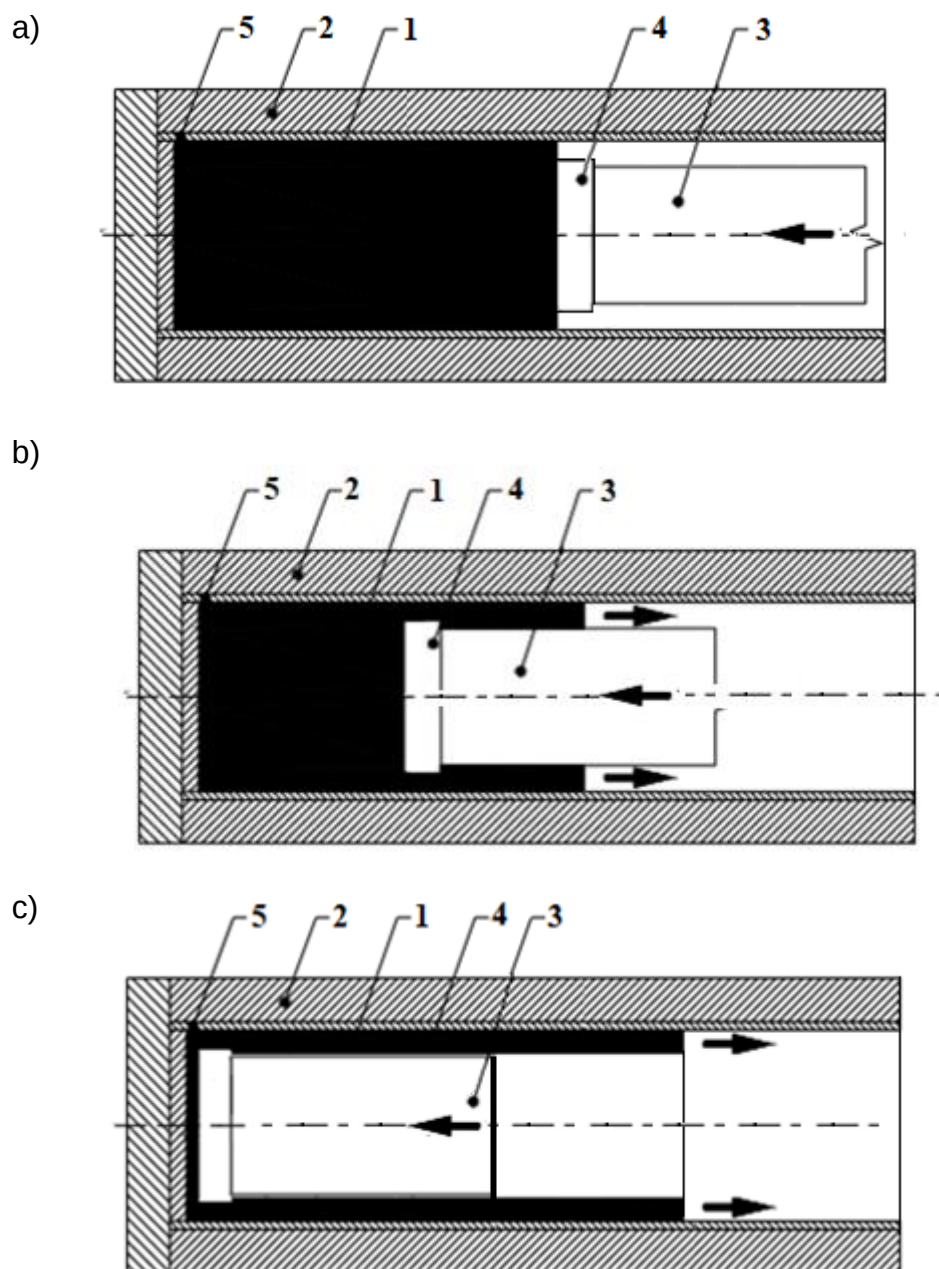


Rysunek 7. Modele geometryczne walcarki skośnej dziurującej: a) dwuwalcowej, b) trójwalcowej; 1 – wałek, 2 – prowadnica, 3 – wsad, 4 – główka dziurująca, 5 – popychacz, 6 – prowadnica przednia, 7 – prowadnica tylna [119]

2.2 Wytwarzanie grubościennych tulei rurowych w prasach

Inną metodą otrzymywania tulei grubościennych jest przebijanie w prasach. Różni się ona od wytwarzania tulei rurowych w skośnych walcarkach dziurujących tym, że powstała tuleja posiada denko, które jest wyrywane w kolejnych etapach procesu produkcji.

Proces dziurowania prowadzony jest na prasach hydraulicznych (poziomych lub pionowych) poprzez wyciskanie. Schemat procesu przedstawiono na rysunku 8. Wlewki o przekroju kwadratowym lub okrągłym umieszczany jest w matrycy o przekroju okrągłym (rys. 8a). Dane literaturowe wskazują, że średnica wewnętrzna matrycy prasy powinna być równa średnicy tulei w stanie gorącym i być większa o $10 \div 20$ mm od średnicy wlewków [21]. Dla ułatwienia wypchnięcia z matrycy tulei rurowej powinna być ona zbieżna od wewnątrz. Stempel poprzez działanie sił mechanicznych zagłębia się wewnątrz metalu (rys. 8b), materiał dostosowuje swój kształt zewnętrzny do kształtu matrycy i po jej wypełnieniu płynie w kierunku przeciwnym do ruchu stempla (wyciskanie przeciwbieżne). Stempel w końcowym położeniu (rys. 8c), nie styka się z dnem matrycy. W efekcie czego powstaje nieprzelotowy otwór. Wyciskanie realizowane jest na gorąco, co korzystnie wpływa na zmniejszenie nacisków i wydłużenie cyklu pracy narzędzi [24, 29, 109].

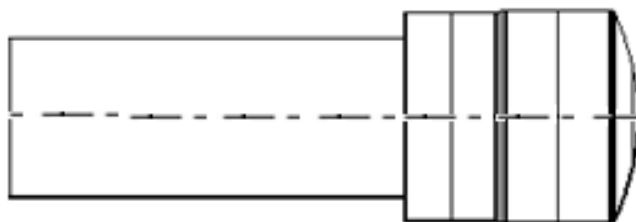


Rysunek 8. Schemat przebijania w prasie grubościennych tulei z dnem: a) pozycja wstępna procesu, b) wprowadzenie stempla do materiału, c) pozycja końcowa stempla

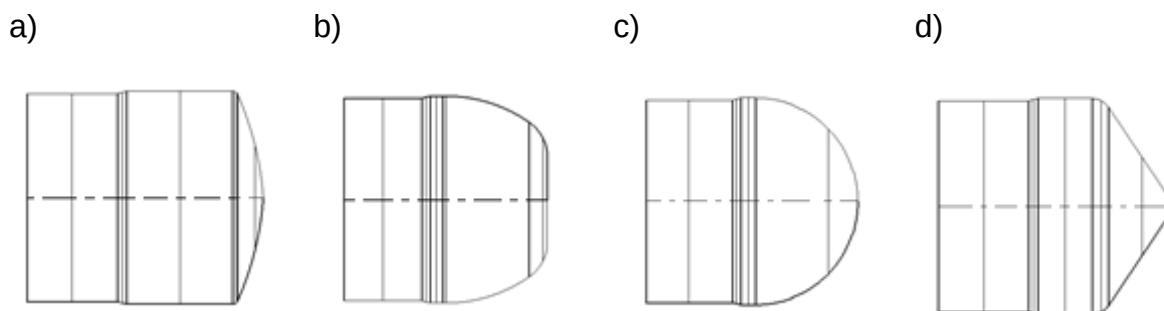
Kolejnym elementem prasy dziurującej jest przebijak (rys. 9). Kształt główki przebijaka ma duży wpływ na wielkość siły przebijania oraz na przebieg płynięcia metalu w matrycy. Wyniki badań prowadzonych przez Kazaneckiego [52] potwierdziły istotny wpływ kształtu główek przebijaka na proces przebijania. Przedstawiono wyniki badań praktycznych i przemysłowych nad wpływem geometrii główek przebijaka na naciski występujące w procesie oraz sposób płynięcia, z których wynika, że kształt

główki przebijaka znacznie wpływa na wielkość siły przebijania oraz na płynięcie materiału w matrycy.

Główkę przebijaków wykonuje się jako kutą ze stali 30HGSA, WCL lub żeliwa sferoidalnego. Po obróbce mechanicznej główka poddawana jest obróbce cieplnej, aby jej twardość nie była niższa niż 230HB, co zapewnia wykonanie około 3000 operacji.



Rysunek 9. Przebijak prasy dziurującej wraz z zamontowaną główką przebijaka



Rysunek 10. Przykładowe kształty główek przebijaka: a) z czołem płaskim, b) zaokrąglona - spłaszczona, c) zaokrąglona, d) stożkowa

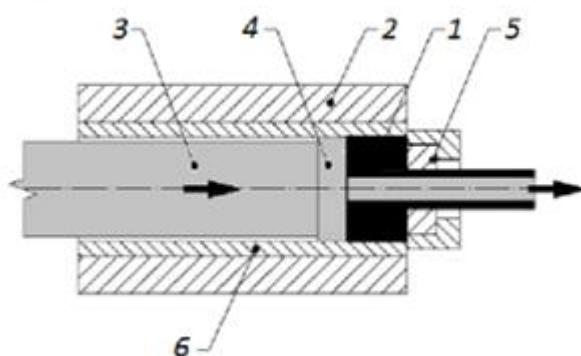
Modyfikacja kształtu główki przebijaka (rys.10) związana ze zmianą zarysu i promieni zaokrągleń umożliwia sterownie płynięciem materiału w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu stempla i wpływa na naciski.

Otrzymana tuleja grubościenna z dnem tzw. szklanka, stanowi półprodukt do dalszych etapów wytwarzania rur bezszwowych, np. w alongatorze, którego zadaniem jest poprawa różnościenności tulei oraz uzyskanie wyrobu kwalifikującego się do dalszego przerobu plastycznego w walcierce pielgrzymowej lub ławie przepychowej. Odpowiednio zaprojektowane narzędzia umożliwią wytwarzanie tulei ze wsadu okrągłego, charakteryzującego się obniżoną różnościennością oraz współosiowością otworu z zarysem tulei.

2.3 Wyciskanie tulei grubościennych

Inną metodą wytwarzania rur bez szwu o zawężonej tolerancji wymiarowej i zmniejszonej chropowatości powierzchni, głównie ze stali stopowych (odpornych na korozję i żaroodpornych) jest wyciskanie polegające na wywieraniu pod wpływem siły mechanicznej nacisku przez stempel na wsad umieszczony w pojemniku, materiał wypływa przez otwór matrycy przyjmując jej kształt. Proces prowadzi się w prasach mechanicznych i hydraulicznych [75].

Na rysunku 11 został przedstawiony schemat wyciskania współbieżnego rur. Stempel wypycha metal przez otwór w matrycy. Kierunek i zwrot wypływania metalu są zgodne z przemieszczaniem się stempla. Na powierzchni tulei pojemnika występuje tarcie w wyniku przemieszczania się metalu, co zwiększa siłę wyciskania [75]. Rysunek 12 przedstawia przykład precyzyjnej rury bez szwu wytworzonej metodą wyciskania.



Rysunek 11. Schemat wyciskania współbieżnego rur: 1 – materiał wyciskany, 2 – pojemnik, 3 – tłoczysko (stempel), 4 – przekładka, 5 – matryca, 6 – tuleja pojemnika [59, 132]



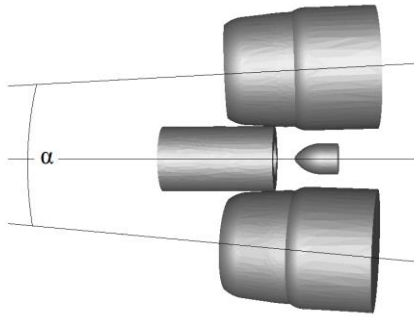
Rysunek 12. Przykład precyzyjnej rury bez szwu wytworzona metodą wyciskania [126]

Trudności w procesie wyciskania stanowią duże naciski powierzchniowe oraz duże zużycie energii. Problemem jest także dobór trwałych i wytrzymałych materiałów wydłużających żywotność narzędzi. Mimo występujących trudności w doborze parametrów technicznych i technologicznych, możliwe jest wytwarzanie rur o precyzyjnych wymiarach i wyższej jakości powierzchni.

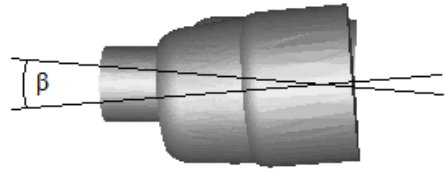
2.4 Walcowanie tulei rurowych w skośnych walcarkach wydłużających

Ze względu na ograniczoną długość grubościenniej tulei z dnem przed procesem walcowania niezbędne jest zwiększenie jej długości oraz usunięcie denka. Etap ten realizowany jest w skośnych walcarkach wydłużających. Przykładowy schemat ustawienia walców w walcarce skośnej wydłużającej uwzględniający kąty zukosowania i rozwałcowania przedstawiono na rysunku 13. Osie walców umieszczone są przestrzennie względem osi tulei, a ich położenie określa się przy pomocy dwóch kątów rozwałcowania α (rys. 13a) i zukosowania β (rys. 13b) [79].

a)



b)

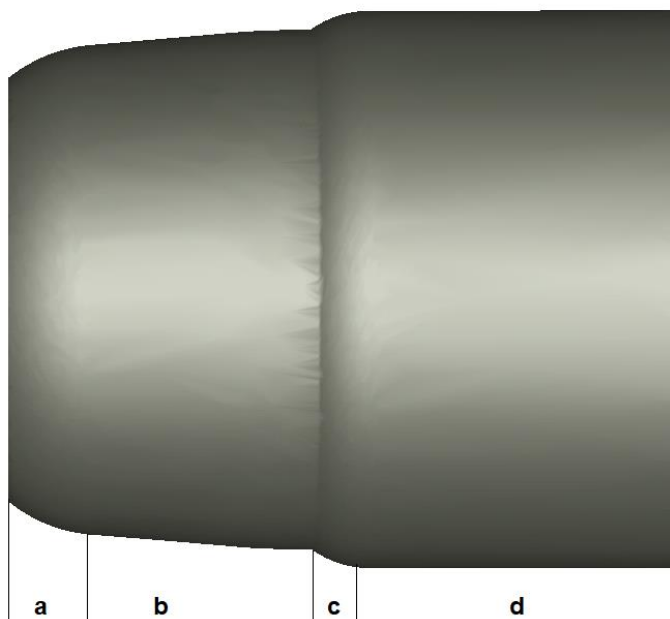


Rysunek 13. Przykładowy schemat ustawienia walcarki skośnej wydłużającej z uwzględnieniem kąta: a) rozwałcowania, b) zukosowania

Kąt nachylenia walca względem osi poziomej nazywany kątem rozwałcowania, jest odpowiedzialny za redukcję średnicy zewnętrznej. Z kolei kąt nachylenia walców w płaszczyźnie poziomej wlewka nazywany jest kątem zukosowania i odpowiedzialny jest za poziomy ruch spiralny rury podczas walcowania. Wynikową nastaw tych kątów jest odkształcenie poprzecznego pola przekroju oraz wydłużenie.

Cechą charakterystyczną walców stosowanych w walcarkach skośnych wydłużających jest ich profil. Na długości beczki walca można wyróżnić (postępując w kierunku walcowania) następujące elementy płynnie przechodzące jeden w drugi (rys. 14):

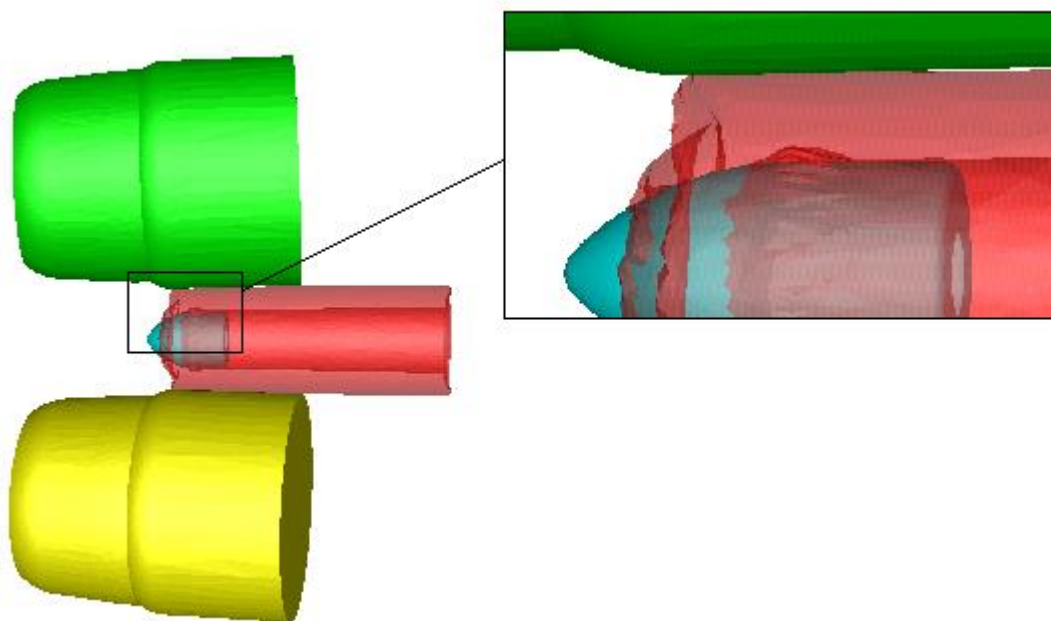
- a) stożek wprowadzający,
- b) stożek walca,
- c) wypukłe osadzenie (występ, próg),
- d) część cylindryczna.



Rysunek 14. Profil walca: a - stożek wprowadzający, b – stożek walca, c - występ, próg, d – część cylindryczna

Pomiędzy stożkowymi częściami walca znajduje się zaokrąglone odsadzenie zwane występem lub progiem, które kieruje szklankę między walce i współpracując z główką, powoduje znaczną redukcję grubości ścianki wydłużanej tulei. W części stożkowej walców zachodzi chwyt szklanki przez walce i częściowe jej wydłużenie. Największe odkształcenie następuje na występie (progu) walców. Najdłuższy odcinek cylindryczny walca kalibruje zewnętrzną średnicę szklanki. Kształt walców i główki dziurującej wpływa na bardziej równomierny rozkład nacisków metalu na czopy walców, zmniejszenie niekorzystnego poślizgu osiowego metalu, uzyskanie tulei z bardziej równomierną średnicą zewnętrzną i grubością ścianki na całej długości, co prowadzi do uzyskania wydłużonej tulei przeznaczonej do dalszej przeróbki plastycznej w walcarce pielgrzymowej [36, 79].

Podczas walcowania w walcarce skośnej wydłużającej grubościenna tuleja podawana jest otworem w kierunku strefy odkształcenia. Rozkład sił tarcia powoduje samoistne wciągnięcie pomiędzy walce i nasunięcie na trzpień rozwalcowujący. Kierunek obrotu walców jest zgodny, a jego następstwem jest przemieszczanie się śrubowo kształtowanej tulei i w efekcie redukcja grubości ścianki tulei [75]. W końcowym etapie następuje dziurowanie i zawalcowanie pozostałości denka (rys. 15).



Rysunek 15. Końcowy etap walcowania w walcarce wydłużającej

Na rysunku 16 przedstawiono początkowy i końcowy etap walcowania w skośnej walcarce wydłużającej. W wyniku walcowania następuje wydłużenie „szklanki” oraz przebicie denka. Powstała w ten sposób tuleja stanowi wsad do walcowania w walcarce pielgrzymowej.

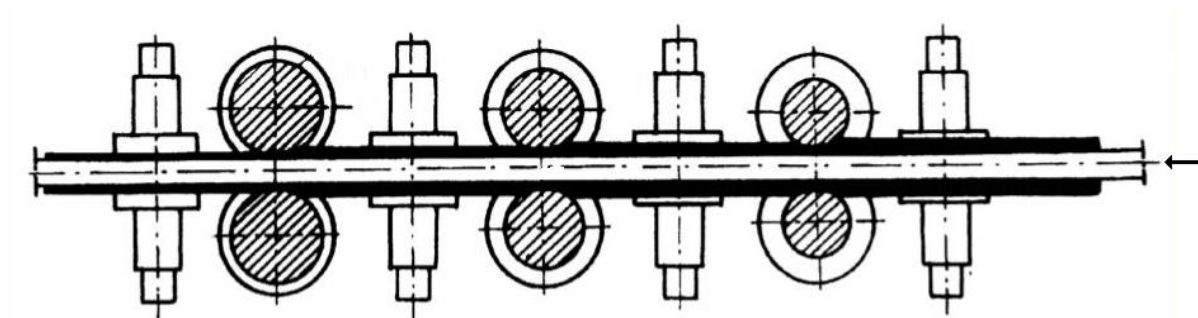


Rysunek 16. Widok walcarki skośnej wydłużającej w początkowym i końcowym etapie walcowania

Nieodpowiednio skalibrowane narzędzia odkształcające mogą powodować w wytworzonej tulei szereg wad i niedoskonałości, m.in. nierówny kształt, różnoosiowość, brak jednakowej grubości ścianki na całej długości. Więcej informacji na temat niedoskonałości otrzymywanej tulei w procesie walcowania w skośnej walcarce wydłużającej można znaleźć w literaturze [41, 44, 57, 77, 108].

2.5 Walcownie rur w walcowniach ciągłych

Opisane w poprzednich rozdziałach sposoby walcowania rur charakteryzują się długim taktem walcowania oraz niską wydajnością. W celu jej zwiększenia oraz poprawy jakości rur przy zmniejszeniu nakładów energetyczno-siłowych opracowano metody ciągłego walcowania rur. Schemat walcowania w walcarce ciągłej przedstawiono na rysunku 17. Walcowanie ciągłe prowadzone jest na trzpieniu i polega na jego wprowadzeniu do tulei grubościennej, w taki sposób, aby główka wchodziła do ostatniej klatki walcowniczej przed walcowanym metalem. Następnie przy działaniu sił tarcia tuleja zostaje wciągnięta w walce i przemieszczając się przez kolejne wykroje klatek, ulega odkształceniu. Następuje redukcja średnicy zewnętrznej, a wewnętrzna uzależniona jest od wymiarów trzpienia [114].



Rysunek 17. Schemat ciągłego walcowania rur [114]

Walcarka składa się z szeregu klatek ułożonych jedna za drugą w niewielkich odległościach, w których jednocześnie na trzpieniu odkształcana jest rura. Istotne jest jednak dokładne sterowanie prędkością obrotową poszczególnych klatek, aby uzyskać równomierne odkształcenie materiału na całej długości walcowanej rury, a tym samym równomierną średnicę i grubość ścianki. Rozróżnia się walcarki ciągłe z trzpieniem swobodnym i sterowanym. Trzpień swobodny przeznaczony jest do pracy na gorąco i w zależności od długości otrzymanej tulei może mieć długość z zakresu $12,8 \div 26$ m. Walcarki ciągłe z zastosowaniem trzpienia sterowanego pracują ze stałą kontrolowaną prędkością, co umożliwia zmniejszenie długości trzpienia i rozszerzenie zakresu wymiarowego produkowanego asortymentu [82].

Po walcowaniu trzpień z rury można usunąć na dwa sposoby, pierwszy polega na jego zwolnieniu przed zakończeniem walcowania (tzw. układ półswobodny) i wraz z rurą przemieszcza się zgodnie z kierunkiem walcowania, a następnie transportowany

jest do urządzenia wyciągającego trzpień. W drugim natomiast rura wraz z trzpieniem transportowana jest do walcarki rozwałkowującej. Po zakończeniu walcowania trzpień wyciągany jest przez wyciągarkę do tyłu. Z analizy literatury [33, 72, 73] wynika, że podczas walcowania następuje równomierne odkształcenie materiału, co umożliwia usunięcie różnościenności na całej długości tulei, a tym samym polepszenie jakości jej powierzchni wewnętrznej.

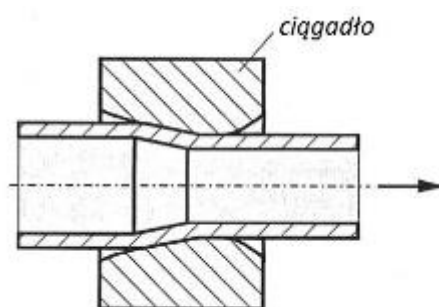
Rozróżnia się układy ciągłe o napędzie zbiorowym i indywidualnym. Ze względu na możliwość przenoszenia napędu przy pierwszym z wymienionych rozwiązań liczba klatek jest ograniczona, zazwyczaj wynosi 9. Walce z napędem indywidualnym umożliwiają produkcję wyrobów o szerszym zakresie wymiarowym, a poprzez zwiększenie odkształcenia całkowitego, produkcję rur o wyższych właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych w porównaniu do klasycznych rozwiązań.

2.6 Ciągnienie rur

Technika wytwarzania rur bez szwu realizowana jest naciągarkach ławowych i umożliwia wytwarzanie rur o szerokim zakresie średnic i grubości ścianek, a także dokładniejszych wymiarach i o zmniejszonej chropowatości powierzchni. Ciągnienie daje też możliwość otrzymania rur kształtowych o przekroju poprzecznym różnym od kołowego (tzw. rury profilowe). Wadą, a właściwie ograniczeniem tej metody jest długość wytwarzanych rur, ponieważ jest zawsze mniejsza od długości roboczejciągarki. Rozróżnia się następujące metodyciągnienia rur [75]:

- swobodne,
- na trzpieniu stałym,
- na trzpieniu swobodnym,
- na trzpieniu długim.

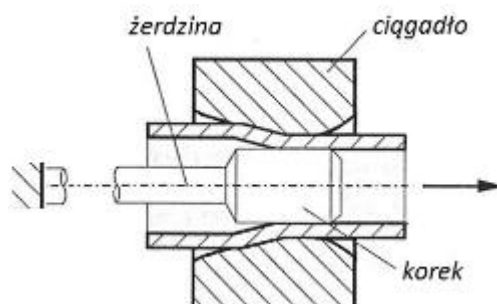
W procesieciągnienia swobodnego (rys. 18) tzw. na pusto, uzyskuje się redukcję przekroju poprzecznego oraz wydłużenie rury bez znaczącej zmiany grubości ścianki. Metoda ta znajduje przede wszystkim zastosowanie w otrzymywaniu rur o małych średnicach (do 30 mm) oraz rur profilowych.



Rysunek 18. Ciągnienie swobodne [56]

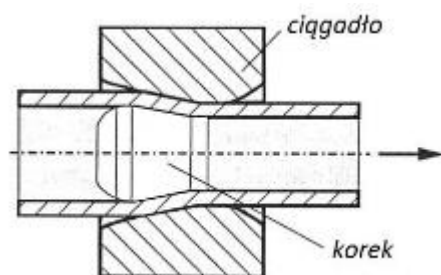
Wciągnienu na trzpieniu stałym (rys. 19) kształtowanie wymiarów rury następuje pomiędzy ciągadłem a nieruchomym trzpieniem o krótkiej części roboczej. Trzpień jest tak pozycjonowany, by jego koniec znajdował się u wylotu z pierścienia kalibrującegociągadła. Rurę nakłada się na trzpień, przewleka się zaostrizony koniec przezciągadło, po czym chwyta go szczękamiciągarki ławowej i ostatecznie przeciąga. Metoda ta umożliwia uzyskanie rury, przy znacznym zmniejszeniu grubości

jej ścianki. Jej wadą natomiast jest długość trzpienia, która uniemożliwia zastosowanie wsadu o długości większej niż jego długość.



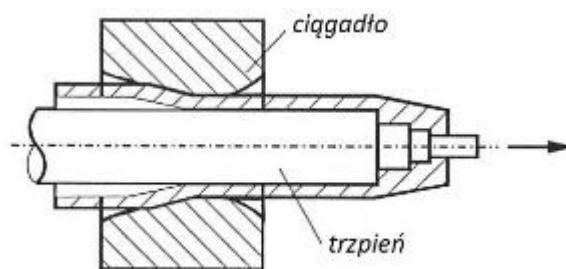
Rysunek 19. Ciągnienie na trzpieniu stałym [56]

Wadę tą usunięto w procesie ciągnięcia rur na trzpieniu (korku) swobodnym (rys. 20) poprzez odpowiedni dobór kształtu korka swobodnego. Zapewniono utrzymanie części cylindrycznej na wyjściu z pierścienia kalibrującego ciągadła. W celu utrzymania główki trzpienia na drągu zastosowano stożek, który utrzymywany jest przez siły tarcia. Zasada działania jest podobna do ciągnięcia na trzpieniu stałym, z różnicą jedynie luźnego trzpienia, który samorzutnie się nastawia. Metoda ta nie posiada ograniczeń dotyczących długości wytwarzanej rury wynikających z długości roboczej ciągarki czy długości trzpienia. Kolejną zaletą jest możliwość sterowania grubością ścianki wyrobu poprzez dobór korka o odpowiednich wymiarach.



Rysunek 20. Ciągnienie na trzpieniu swobodnym [56]

Ciągnięcie rur na trzpieniu długim (rys. 21) polega na kształtowaniu rury pomiędzy nieruchomym ciągadłem a trzpieniem o części roboczej, której długość jest większa od długości gotowej rury. Ze względu na fakt, iż trzpień przechodzi przez ciągadło wraz z rurą zmniejsza się tarcie na jej powierzchni wewnętrznej, w konsekwencji czego można uzyskać większe wartości współczynnika wydłużenia.

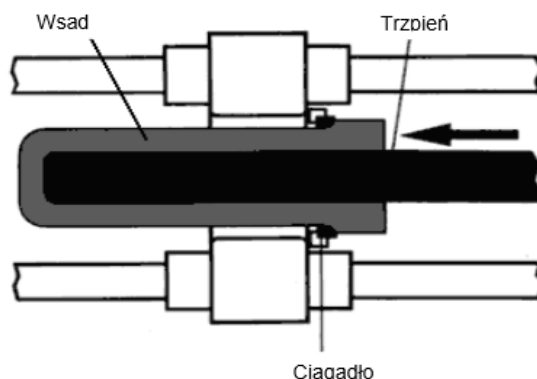


Rysunek 21. Ciągnięcie rur na trzpieniu długim [56]

W każdej z opisanych metod ciągnięcia materiałem wsadowym jest rura, a ciągnione wyroby charakteryzują się lepszą jakością powierzchni rur o grubszej ściance (powyżej 1,5 mm) oraz zwiększoną dokładnością średnicy rury (współosiowością). Wadami metody ciągnięcia rur są trudności w wyciąganiu trzpienia z rury oraz pogorszenie jakości powierzchni rury o grubości ścianki poniżej 1,5 mm. Do zalet zalicza się możliwość sterowania procesem oraz wytwarzanie rur kształtowych.

2.7 Walcowanie rur na ławie przepychowej

Jedną z metod wytwarzania rur, która powstała na bazie procesu ciągnięcia jest produkcja na ławie Ehrhardta. Pierwotnie polega na przepychaniu tulei z dnem osadzonej na trzpieniu przez pierścień, jej schemat przedstawiono na rysunku 22.



Rysunek 22. Schemat procesu przepychania tulei systemem Ehrhardta [3]

Duże utrudnienie stanowi odpowiednia jakość trzpieni przepychowych oraz sposób płynięcia materiału i sam przebieg przepychania. Istotny wpływ mają także:

- siła tarcia, która podczas przemieszczania na trzpieniu zwiększa opór płynięcia materiału,
- siła zaciskowa, która związana jest z przyleganiem rury do trzpienia,
- jakość powierzchni i własności mechaniczne,
- smarowanie oraz stopień nagrzewania trzpienia podczas procesu.

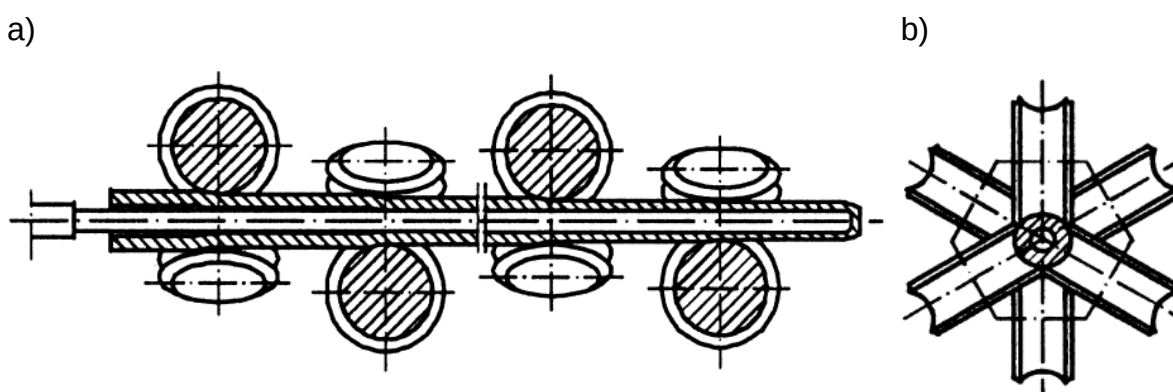
W związku z trudnościami wynikającymi z przebiegu procesu konieczna była jego modernizacja i rozbudowa.

Z biegiem lat rozwój technologiczny i rozbudowa tej metody przez Calmesa polegała na umieszczeniu skośnej walcarki wydłużającej pomiędzy prasę przebijającą a walcarkę przepychową [36]. Skośna walcarka wydłużająca ma za zadanie wydłużyć tuleję otrzymaną w pierwszym etapie procesu: w czasie przebijania półwyrobu na prasie lub dziuowania ich w walcarce skośnej. Umożliwiło to zmniejszenie grubości ścianki oraz łatwiejsze przedziurowanie tulei.

Kolejnym etapem rozwoju tej metody było zastosowanie ciągadeł rolkowych oraz trzy- i czterowalcowych klatek. Takie rozwiązanie ułatwiło płynięcie materiału względem narzędzi roboczych (walce i trzpień) co wpłynęło pozytywnie na jakość

zewnętrznej powierzchni rury. Intensyfikacja odkształcenia może nastąpić poprzez zastosowanie zestawu pierścieni o zmniejszających się średnicach, w których tuleja podlega redukcji przekroju jednocześnie w kilku pierścieniach. Dzięki takiemu rozwiązaniu poprzez zmniejszenie sił występujących podczas procesu można wytwarzać rury o zawężonych tolerancjach wymiarowych. Spotykane są rozwiązania stosowania ciągadeł trójrolkowych lub pięciorolkowych.

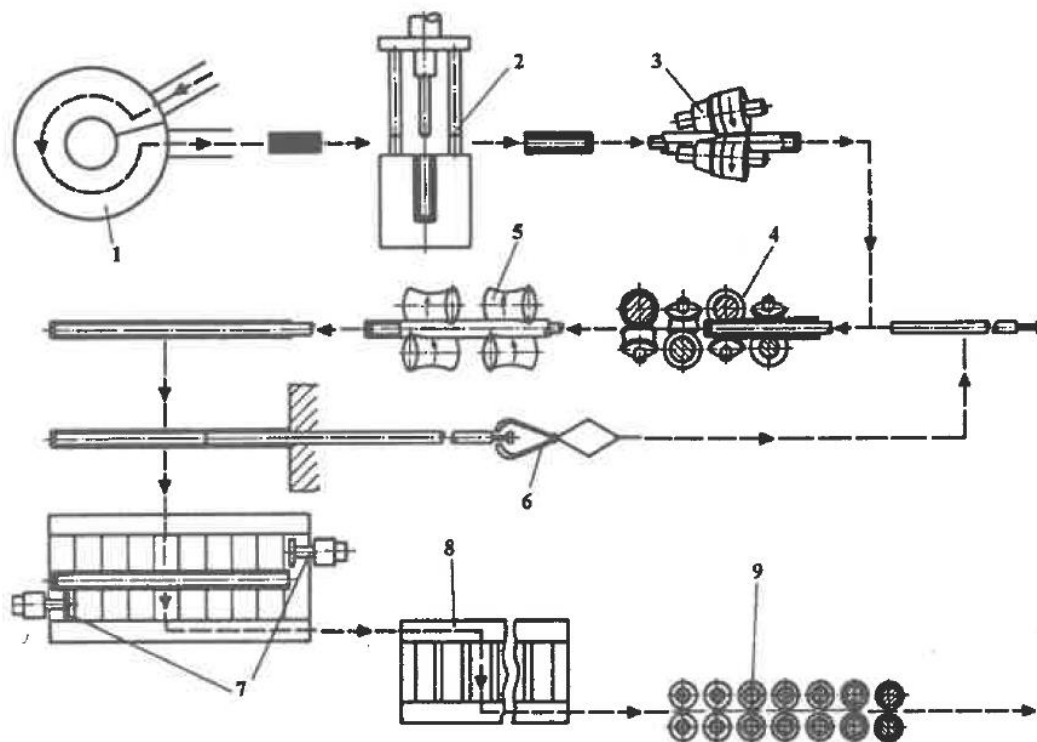
Rozbudowaniem tej metody jest tzw. ława przepychowa bazująca na tej samej technologii działania. W procesie tym, tuleja nasadzona na drąg i następnie przepychana jest przez kilka ciągadeł zwykłych lub rolkowych ustawionych szeregowo w osi tworząc wykroje o malejącej powierzchni przekroju. W praktyce stosowane są ciągadła rolkowe, które zmniejszają opory tarcia. Drąg przepychający opiera się jednym końcem o denko tulei, na drugim końcu posiada zębatkę. Układ napędowy wprawia w ruch koło zębate przekazując siłę na zębatkę i wymuszając ruch posuwisty tulei przez kolejne ciągadła, w których obrót rolki wymuszony jest przez tarcie z przesuwającym się materiałem. W ciągadłach rolkowych zwykle stosuje się dwa rodzaje walców: spłaszczające (płaska beczka, tworzy wykrój kwadratowy lub trójkątny) i profilowe (wklęsły kształt beczki, tworząc wykrój raczej kołowy). Oba rodzaje wykrojów ułożone są zazwyczaj na przemian parami [3]. Usytuowanie wykroju walców względem linii odkształcenia zostało przedstawione na rysunku 23. Zaprezentowane walce ułożone są wzdłuż (rys. 23a) oraz w poprzek (rys. 23b) względem kierunku odkształcenia.



Rysunek 23. Usytuowanie wykroju walców względem odkształcenia:

a) wzdłuż, b) w poprzek [36]

Schemat rozmieszczenia urządzeń w walcowni przepychowej przedstawiono na rysunku 24. Przed odkształceniem w ławie przepychowej konieczne jest nagrzanie wlewków i wydłużenie na walcierce skośnej wydłużającej.



Rysunek 24. Schemat podstawowych urządzeń walcowni przepychowej:

1 – piec z obrotowym trzonem, 2 – prasa przebijająca, 3 – trójwalcowa skośna walcarka wydłużająca, 4 – walcarka przepychowa, 5 – rozwalcarka, 6 – wyciągarka trzpieni, 7 – piły do obcinania końców, 8 – piec dogrzewczy, 9 – walcarka redukująca z naciągami [89]

Po etapie przepychania rura wsadowa z trzpieniem przekazywana jest na rozwalcarkę, w której odkształcenia obwodowe powodują tylko oddzielenie zaciśniętego w rurze trzpienia i w efekcie łatwiejsze jego wyciągnięcie. Kolejnym etapem jest obcięcie części rury stanowiącej odpad technologiczny, dogrzewanie w piecu i walcowanie redukcyjne z naciągami. Zastosowanie walcowania z naciągami powoduje obniżenie nacisków, a tym samym umożliwia uzyskanie wyrobu o zawężonej tolerancji wymiarowej.

Zaletami tej metody są m.in. niskie naciski i siła przepychania. W ten sposób produkowane są rury o najmniejszych grubościach ścianki, z dokładniejszym kształtem i mniejszych odchyłkach wymiarowych, tj. rury do specjalistycznych zastosowań

np. rury mechaniczne oraz rury wsadowe stanowiące półprodukt do przeróbki plastycznej na zimno. Największą wadą jest trudność w wyciągnięciu drąga z surowej rury [3]. Powstałe wady są rozwalcowywane i kalibrowane na właściwych urządzeniach w późniejszych etapach. Na rysunku 25 przedstawione zostały zdjęcia z Walcowni Rur Andrzej z procesu walcowania rur w ławie przepychowej.



Rysunek 25. Walcowanie w praktyce w Walcowni Rur Andrzej [131]

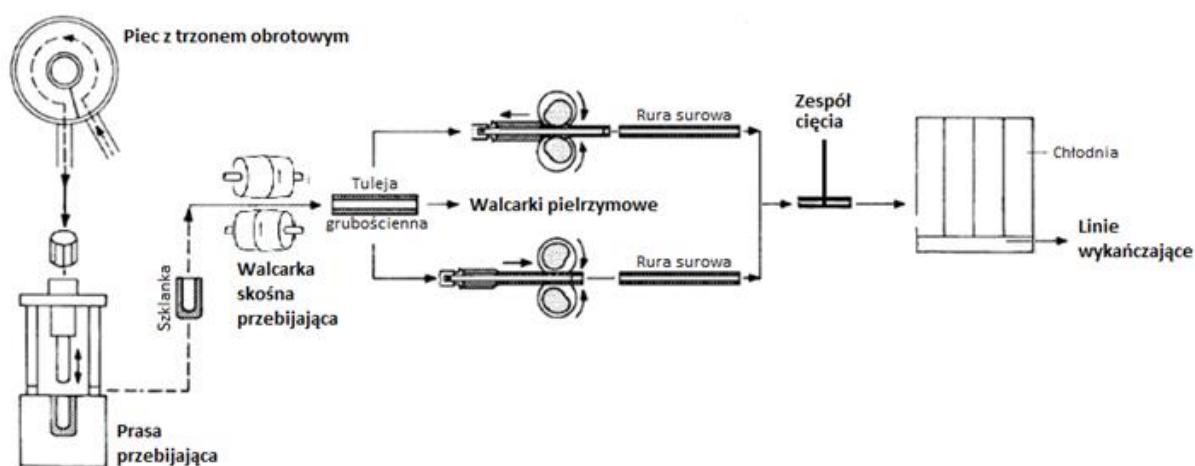
2.8 Wytwarzanie rur stalowych w walcowni pielgrzymowej

Jednym z najpopularniejszych sposobów wytwarzania bezszwowych rur stalowych oraz z metali nieżelaznych i ich stopów, jest walcowanie metodą pielgrzymową, zarówno w procesach walcowania na gorąco, jak i na zimno. Sposób ten został opracowany i opatentowany w 1885 roku przez braci Maxa i Reinharda Mannesmannów [80].

Zaletą jej jest duża uniwersalność oraz szeroki zakres średnic i grubości ścian rur, przy stosunkowo prostym osprzęcie walcowniczym [36, 44]. Technika ta posiada również i wady, a największą z nich jest niski uzysk spowodowany dużym odpadem technologicznym [46].

Na rysunku 26 przedstawiono schemat rozmieszczenia urządzeń w przykładowej walcowni pielgrzymowej. Proces technologiczny wytwarzania rur bez szwu w walcowniach pielgrzymowych obejmuje następujące etapy [36]:

1. nagrzewanie w piecu z obrotowym trzonem;
2. dziurowanie na prasie hydraulicznej;
3. walcowanie w walcarce wydłużającej (alongator);
4. walcowanie w walcarce pielgrzymowej;
5. walcowanie w walcarce kalibrującej;
6. chłodzenie i wykańczanie.



Rysunek 26. Schemat walcowni z walcarką skośną typu Mannesmana oraz walcarkami pielgrzymowymi [95]

Wlewki o przekroju kwadratowym lub okrągłym i długościach zależnych od wymiarów gotowych wyrobów nagrzewane są w piecu z obrotowym trzonem do

temperatury około 1180°C. Przed rozpoczęciem procesu dziurowania z powierzchni wlewka usuwana jest warstwa tlenków żelaza (zgorzelina) za pomocą hydraulicznego zbijacza zgorzeliny, którego przykładowe zdjęcie przedstawiono na rysunku 27.

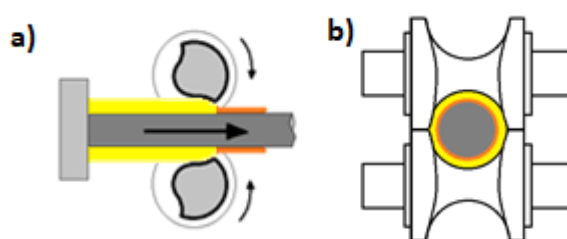


Rysunek 27. Usuwanie zgorzeliny w zbijaczu hydraulicznym

Zgorzelina stanowi twardą warstwę, która mogłaby zostać w kolejnych operacjach zaprasowana w materiale i stanowić przyczynę powstawania wad wewnętrznych w gotowym wyrobie lub powodować przyspieszone zużycie narzędzi [28, 46, 94, 117]. Jest to szczególnie istotne w procesie dziurowania opisanym w rozdziale 2.1. Zgorzelina może być przyczyną nadmiernego zużywania się główki przebijaka oraz być wprowadzana do wnętrza tulei, powodując wady wewnętrzne powierzchni. W ekstremalnym przypadku może nagromadzić się w denku. Tuleja grubościenna z dnem (szklanka) jest krótka i należy poddać ją procesowi wydłużenia w walcierce wydłużającej zwanej alongatorem. Jest to walcarka skośna dwuwalcowa, najczęściej w systemie Mannesmanna. Jej budowa, charakter pracy, wady i zalety opisane zostały w rozdziale 2.4. Po zakończeniu procesu walcowania w alongatorze, uzyskiwana jest przelotowa tuleja (szklanka), wstępnie wydłużona i pozbawiona denka.

2.8.1 Walcarka pielgrzymowa

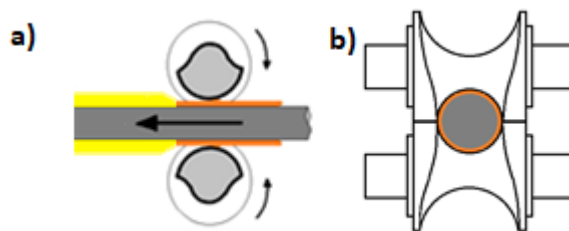
Głównym elementem walcowni tego typu są dwie walcarki pielgrzymowe pracujące naprzemiennie w celu zapewnienia większej wydajności. W stojaku zamocowane są dwa walce o okresowo zmiennym wykroju, w których następuje przeciwsobne walcowanie oraz specjalny aparat do podawania i obrotu walcowanej tulei wykonujący ruch posuwisto-zwrotny wraz z tuleją. Na rysunku 28 przedstawiono schemat rozpoczęcia walcowania rury metodą pielgrzymową podczas obrotu walca i od czoła.



Rysunek 28. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową:

a) podczas obrotu walca, b) od czoła [125]

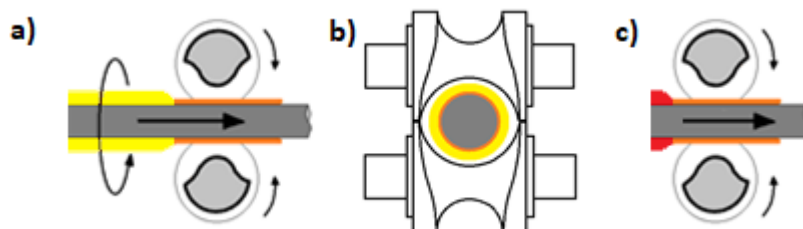
Następuje przeciwsobne walcowanie tulei w efekcie obrotu walców, gdzie ścianki tulei najpierw są skuwane uderzeniem ($3 \div 4$ uderzenia) przez kolejną część wykroju. Powoduje to dosunięcie rury do aparatu podawczego i zaciśnięcie jej swobodnego końca na trzpieniu, który mocowany jest w uchwycie aparatu podawczego i zabezpieczony przed wypadnięciem poprzez specjalny element dociskany do aparatu przez końcówkę rury w całym etapie walcowania, nazywany tuleją oporową. Trzpień, na który nasunięta jest grubościenna tuleja, odpowiedzialny jest za poprawne wprowadzenie wsadu pomiędzy walce (przeciwnie do ich ruchu obrotowego) i inicjację procesu walcowania. Na rysunku 29 przedstawiono schemat walcowania pielgrzymowego rury na trzpieniu w części roboczej wykroju walca.



Rysunek 29. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową:

a) podczas obrotu walca, b) od czoła [125]

W trakcie jednego uderzenia następuje skucie (przeciwsobne przemieszczanie materiału wywołane oddziaływaniem roboczej części wykroju na metal) na długości uzależnionej od profilu walca i jego średnicy, w trakcie którego częściowo odkształcona tuleja jest cofana wraz z trzpieniem powodując sprężanie powietrza w cylindrze znajdującym się na drugim końcu aparatu podawczego. W sytuacji, w której dalsza część wykroju walca gwałtownie zwiększa swój prześwit, ciśnienie zgromadzone w cylindrze zapewnia siłę do wprowadzenia rury w jałową jego część o ściśle określonej długości z jednoczesnym obrotem o kąt około 90° (w celu uniknięcia wypływki w tym samym miejscu, w praktyce stosuje się obrób o 92°), co zostało przedstawione na rysunku 30.



Rysunek 30. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową: a) podczas obrotu walca, b) od czoła, c) powstawanie kielicha - niedowalcowanego fragmentu rury [125]

W ten sposób walcowanie następuje na określonej długości, a dzięki powtarzającym się cyklom wpychania przez walce odwalcowanego odcinka rury odbywa się z jej podaniem i skręceniem. Konstrukcja osprzętu walcowniczego, którego zadaniem jest zabezpieczenie trzpienia przed wypadnięciem z aparatu podawczego podczas ruchu posuwisto – zwrotno – obrotowego uniemożliwia walcowanie całej długości tulei i w związku z tym powoduje powstawanie odpadu technologicznego. W efekcie część materiału nie jest walcowana, ponieważ musi dociskać element

zabezpieczający. Niedowalcowany fragment rury z racji kształtu nazywany jest kielichem i przed obróbką wykańczającą musi zostać odcięty. Stanowi złom i może trafić do działu stalowni. Na rysunku 31 została przedstawiona rura z odpadem technologicznym.



Rysunek 31. Rura z odpadem technologicznym tzw. kielich

W efekcie technologia walcowania pielgrzymowego rur charakteryzuje się niskim uzyskiem około $72 \div 78\%$ ze względu na odpad, który jest tym większy im większe są wymiary rury i grubości ścianki. Na rysunku 32 przedstawiono przykładowe zdjęcia przekroju kielichów odciętych z rury po procesie walcowania w walcarce pielgrzymowej.



Rysunek 32. Przykłady kielichów jako odpad technologiczny

Rysunek 33 przedstawia proces walcowania rury na walcarce pielgrzymowej.



Rysunek 33. Rura w procesie walcowania na walcarce pielgrzymowej

Jakość rury gotowej wytworzonej w procesie walcowania pielgrzymowego zależy od m.in. szybkości podania tulei, kąta obrotu tulei, skalibrowania części roboczej walców, prześwitu między walcami oraz jakości narzędzi i synchronizacji współpracy specjalnego aparatu z walcarką pielgrzymową. Nieodpowiednie sterowanie parametrami procesu może skutkować pojawieniem się niedoskonałości w końcowej rurze. Do tych wad zaliczyć można różnościenność, różnoosiowość, powstanie wypłytki czy efektu „bambusa”.

Proces walcowania pielgrzymowego rur bezszwowych charakteryzuje się niskim uzyskiem oraz dynamiczną pracą. Wydłużony czas walcowania (takt walcowniczy $T = 90 \div 160$ s.) rury o cienkiej ściance i dużej powierzchni powoduje znaczne obniżenie temperatury ku końcowi procesu. Efektem tego są duże wartości sił nacisku, które mogą przyczynić się do pęknięcia walców czy uszkodzenia całego zespołu walcowniczego.

W procesie przemysłowym ważne są właściwie dobrane parametry całego przebiegu pielgrzymowego walcowania, ponieważ to właśnie one sumarycznie mają najistotniejszy wpływ na jakość końcowego produktu, a także na eksploatację narzędzi biorących udział w procesie produkcyjnym.

2.9 Podsumowanie rozważań teoretycznych

Obecnie metody wytwarzania rur bez szwu oparte są na wysokowydajnych procesach, w których zespół prasy dziurującej i walcarki wydłużającej został zastąpiony przez walcarkę trójwalcową skośną dziurującą. Modyfikacje walcowni pielgrzymowych nie były prowadzone od dziesięcioleci i w literaturze brak jest wyników związanych z tym zagadnieniem. W dalszym ciągu istnieją walcownie wytwarzające rury bez szwu metodą pielgrzymową i chcąc konkurować na rynku muszą obniżać koszty produkcji lub poprawiać jakość gotowych wyrobów.

W walcowniach pielgrzymowych bez względu na zastosowaną technikę wytworzenia tulei rurowych to walcowanie w walcarce pielgrzymowej jest najistotniejszą częścią procesu kształtowania rury. Podczas procesu trzpień zamocowany jest w uchwycie i zabezpieczony przed wypadnięciem przez specjalny element dociskany do aparatu przez końcówkę rury w całym etapie walcowania, nazywany tuleją oporową. W efekcie część materiału nie jest walcowana, ponieważ musi dociskać element zabezpieczający. Niedowalcowany fragment rury przed obróbką wykańczającą musi zostać odcięty. Powoduje to, że omawiana metoda charakteryzuje się niskim uzyskiem. W ramach współpracy Politechniki Częstochowskiej z jednym z zakładów wytwarzających rury bezszwowe metodą pielgrzymową opracowano sposób mocowania w aparacie podawczym tulei zabezpieczającej trzpień, na którym prowadzone jest walcowanie [45]. Badanie czystości patentowej wykazało brak rozwiązania technicznego umożliwiającego dowalcowanie kielicha. Wdrożenie rozwiązań opisanych w patencie przez jego właściciela umożliwiło przeprowadzenie prób technologicznych. Wykazały one, że dowalcowana kielichowa część rury posiada wady wewnętrzne w postaci zawalcowań (rys. 34), co powoduje, że pomimo zachowania geometrycznych parametrów część rury z dowalcowanego kielicha musi zostać odcięta nie poprawiając uzysku procesu. Pojawiła się zatem luka badawcza, która umożliwiłaby opracowanie wytycznych do bezkielichowego walcowania rur metodą pielgrzymową zwiększającego uzysk procesu.



Rysunek 34. Przykłady kielichów w przekroju

3. Teza i cel pracy

W pracy podjęto próbę opracowania na podstawie badań modelowych nowej technologii wytwarzania rur metodą pielgrzymową, charakteryzującej się zwiększonym uzyskiem i mniejszą materiałochłonnością. W trakcie prób technologicznych walcowania tulei grubościennej za pomocą walcarki pielgrzymowej ze zmodyfikowanym aparatem podawczym zapewniającym walcowanie bezkielichowe wytworzono wyrób dłuższy od walcowanego tradycyjną metodą, ale z wadami. Przeprowadzone badania oceny wyrobu wykazały zawalcowania na długości rury powstałej z dowalcowanego kielicha. Pomimo odcięcia części z wadami rura była dłuższa o około 0,25 m w porównaniu do wytwarzanej metodą tradycyjną. Wstępna analiza wykazała, że poprzez sterowanie nastawami osprzętu walcowniczego oraz odpowiedni dobór parametrów technologicznych możliwe jest wymuszenie płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia umożliwiającego pełne wykorzystanie założeń bezkielichowego walcowania rur metodą pielgrzymową, czyli dowalcowanie kielicha bez wad. Na tej podstawie zdefiniowano tezę i cel pracy:

Stosując narzędzia numeryczne do modelowania procesów przeróbki plastycznej możliwe jest opracowanie parametrów technologicznych wytwarzania rur stalowych metodą bezkielichowego walcowania rur w walcarce pielgrzymowej, które zapewnią uzyskanie wyrobu wolnego od wad wewnętrznych.

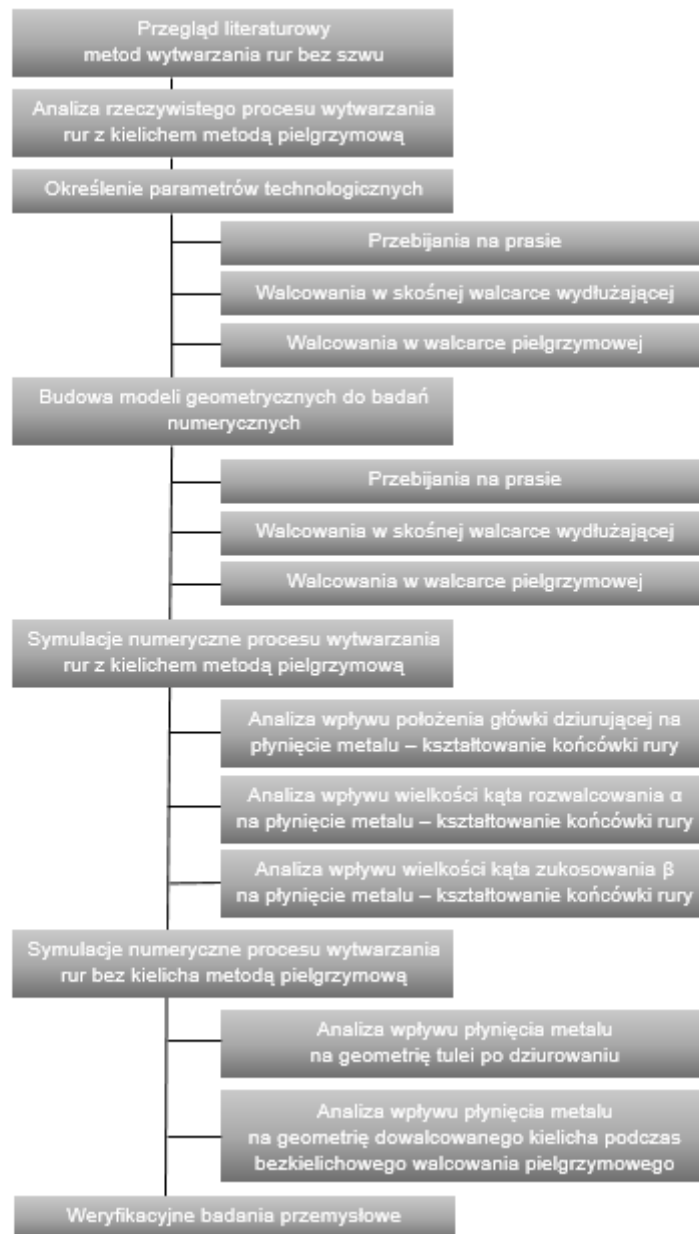
Celem badawczym jest określenie takiego schematu płynięcia metalu podczas wytwarzania rur metodą bezkielichową, który umożliwi powtarzalne dowalcowanie kielicha w walcarce pielgrzymowej zapewniając zwiększenie długości przy spełnieniu wymogów jakościowych.

Dla wskazania słuszności tezy oraz zrealizowania celu pracy przeprowadzono następujące badania:

1. analizę rzeczywistego procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową:
 - określenie parametrów technologicznych
 - przebijania na prasie wlewka kwadratowego,
 - walcowania w skośnej walcarce wydłużającej tulei grubościennej z dnem,
 - walcowania rur w walcarce pielgrzymowej tulei grubościennej bez dna,
2. budowę modeli geometrycznych niezbędnych do przeprowadzenia badań numerycznych:
 - przebijania na prasie,

- walcowania w skośnej walcarce wydłużającej,
 - walcowania w walcarce pielgrzymowej,
3. przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową,
 4. przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu wytwarzania rur bez kielicha metodą pielgrzymową:
 - dokonanie analizy wpływu płynięcia metalu na geometrię tulei po dziurowaniu,
 - dokonanie analizy wpływu płynięcia metalu na geometrię dowalcowanego kielicha podczas bezkielichowego walcowania pielgrzymowego,
 - przeprowadzenie weryfikacyjnych badań przemysłowych.

Schemat analizowanego planu badawczego przedstawiono na rysunku 35.



Rysunek 35. Schemat zakresu badań

Zaplanowane i przeprowadzone badania umożliwiły uzyskanie wyników, na podstawie których możliwe było potwierdzenie postawionej tezy naukowej oraz osiągnięcie zamierzonego celu pracy.

4. Badania własne

4.1 Analiza rzeczywistego procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową

Proces wytwarzania rur metodą pielgrzymową został szczegółowo opisany w części teoretycznej w rozdziale 2.8. Po zapoznaniu się z profilem produkcji do analizy procesu wytypowano rurę o średnicy $\varnothing = 177$ mm i grubości ścianki $g = 28$ mm w gatunku S235, zgodnej z normą PN-EN 10210-1 [83]. Jest to najczęściej wytwarzany wyrób i co za tym idzie możliwa będzie weryfikacja opracowanych na drodze symulacji komputerowych parametrów technologii bezkielichowego walcowania w warunkach przemysłowych.

4.1.1 Określenie parametrów technologicznych wyciskania na prasie wlewka kwadratowego

Proces wyciskania tulei realizowany jest na prasie poziomej o maksymalnej sile nacisku 1200 N. Możliwości technologiczne zapewniają uzyskanie denka o grubości około 40 mm. Wyciskanie prowadzone jest w matrycy zbieżnej na główce przebijaka o kształcie cylindrycznym, ponieważ zgodnie z danymi zamieszczonymi w [36] rozwiązanie to najkorzystniej wpływa na sposób płynięcia materiału i uzyskiwane siły nacisku.

Wlewki kwadratowe o przekroju $280 \times 280 \text{ mm}^2$ i długości około 1650 mm przed procesem odkształcania nagrzewane są w piecu z okrągłym trzonem do temperatury około 1220°C i po wyjściu z pieca transportowane są samotokiem do prasy. Przed wprowadzeniem do matrycy z powierzchni wlewka usuwana jest warstwa tlenków (zgorzelina) za pomocą hydraulicznego zbijacza. Do powierzchni czołowej wlewka ustawionego na stole podawczym dosuwana jest matryca wykonana ze staliwa L35HM. Po wprowadzeniu początku wsadu w matrycę, stół podawczy jest usuwany, a matryca dosuwana jest do główki przebijaka zamocowanej na trzpieniu prasy. Główka przebijaka o średnicy $\varnothing = 215 \text{ mm}$ i długości $l = 215 \text{ mm}$ wykonana jest ze stali WCL. Na rysunku 36 przedstawiono wlewek kwadratowy wprowadzany do matrycy prasy.



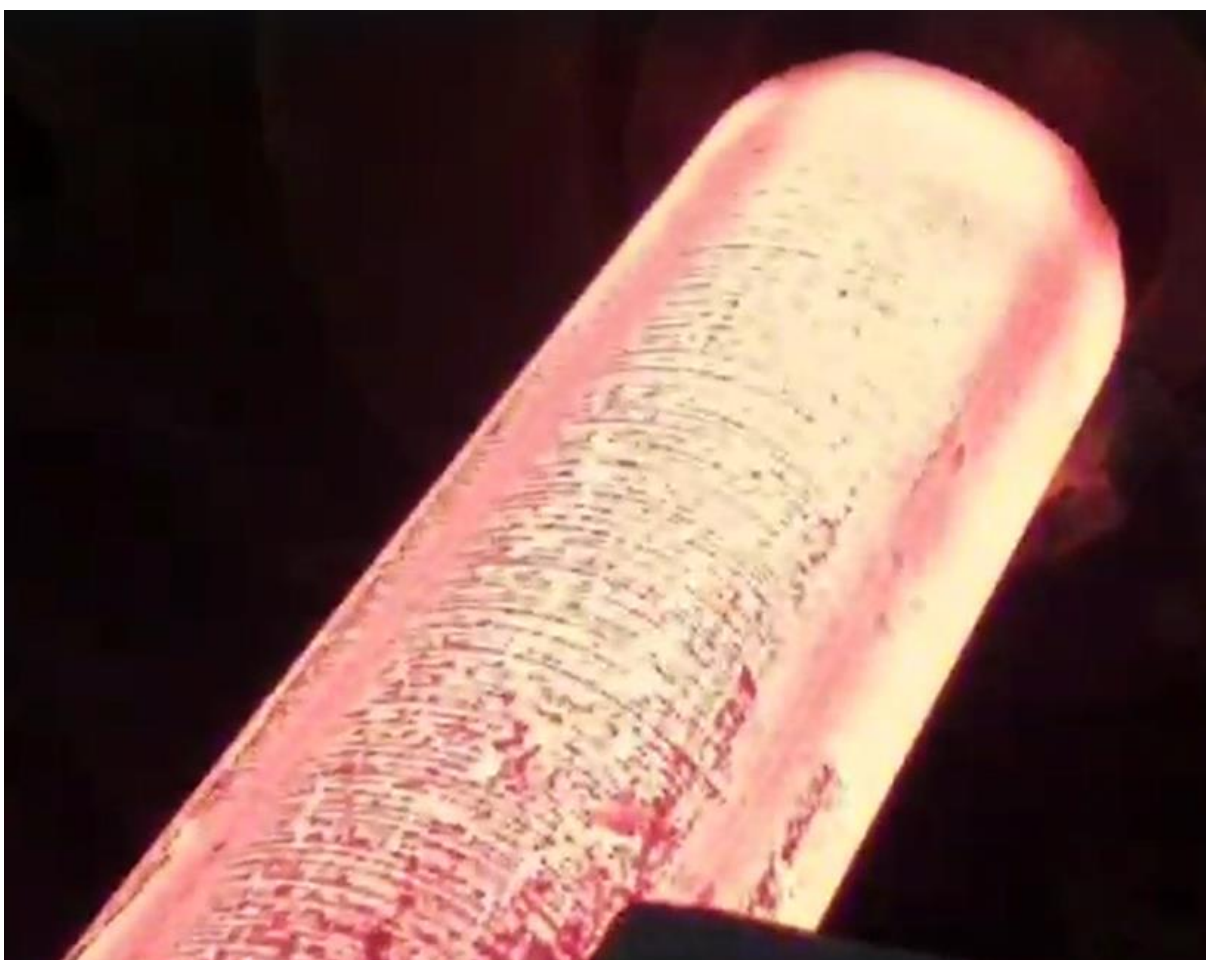
Rysunek 36. Wlewek przygotowany do wprowadzenia do matrycy prasy

Po zamknięciu matrycy tuleją będącą jednocześnie chłodnicą natryskową trzpienia rozpoczyna się proces wyciskania, który prowadzony jest z prędkością około 0,1 m/s. Po zakończeniu ruchu roboczego wypychacz zamontowany od czoła matrycy inicjuje wypychanie tulei z matrycy zsynchronizowane z wyciąganiem trzpienia wraz z główką oraz wycofywana jest matryca.

W wyniku wyciskania powstaje grubościenna tuleja z dnem o średnicach $\varnothing_1 = 215$ mm i $\varnothing_2 = 415$ mm i długości $l = 1300$ mm. Moment rozpoczęcia wyciągania tulei z prasy został przedstawiony na rysunku 37. Zastosowanie takiego rozwiązania (matryca stożkowa z płaską główką przebijaka) według [36] powinno zapewnić różnościenność tulei na poziomie $1,5 \div 2,0$ mm. Na rysunku 38 przedstawiono powierzchnię tulei grubościennej po procesie wyciskania w prasie.



Rysunek 37. Przykład tulei grubościennnej w momencie wyciągania z prasy



Rysunek 38. Widok powierzchni tulei grubościennnej po procesie wyciskania w prasie

4.1.2 Określenie parametrów technologicznych walcowania w skośnej walcarce wydłużającej

Zwiększenie długości tulei grubościenniej wyciśniętej na prasie oraz usunięcie jej denka odbywa się w skośnej walcarce wydłużającej, tzw. alongatorze. Proces został szczegółowo opisany w rozdziale 2.4. Skośna walcarka wydłużająca (rys. 16) składa się z dwóch walców przedstawionych na rysunku 39, główki dziurującej oraz popychacza. Walec o długości beczki $L = 900$ mm oraz średnicy stożka wprowadzającego $\varnothing_1 = 657$ mm i średnicy części cylindrycznej $\varnothing_2 = 755$ mm wykonany jest ze stali L35GSM. Główka dziurująca o średnicy $\varnothing = 250$ mm wykonana jest ze stali 30HGS.



Rysunek 39. Walce alongatora w zakładzie przemysłowym

Zgodnie z danymi zamieszczonymi w części literaturowej pracy położenie walców określa się względem osi tulei za pomocą kąta rozwałcowania α i kąta zukosowania β , których wartości mieszczą się w zakresie $\alpha = 3 \div 4^\circ$ i $\beta = 3 \div 6^\circ$. Charakterystyczny profil walca składający się z części stożkowej i cylindrycznej połączonych progiem, powoduje zmieniające się odkształcenie materiału na całej jego długości. Położenie główki alongatora, której zadaniem jest odkształcanie wewnętrznych warstw metalu określone jest w odniesieniu do progu walców.

Z grubościenniej tulei wytworzonej w prasie hydraulicznej usuwana jest sprężonym powietrzem z jej wnętrza zgorzelina. Następnie tuleja podawana jest do walcarki otworem w kierunku walcowania. Popychacz dosuwa tuleję grubościenną do walców i następuje jej chwyt. Walce obracając się w tym samym kierunku z prędkością 120 obr./min., powodują samoistne wciąganie tulei i jej obracanie się linią śrubową wokół osi, zapewniając odkształcenie na całym obwodzie. Efektem jest częściowe wydłużenie tulei, która następnie wprowadzana jest na główkę dziurującą. W części stożkowej walca wraz z przemieszczaniem się tulei następuje stopniowa intensyfikacja odkształcenia, które swoją największą wartość przyjmuje w części progu walca. Następuje największa redukcja ścianki tulei. Końcowym efektem jest dziurowanie, czyli wyrwanie denka i zawalcowanie jego pozostałości. Na rysunku 40 zostało przedstawione przykładowe denko po wyrwaniu.



Rysunek 40. Przykład wyrwanego denka

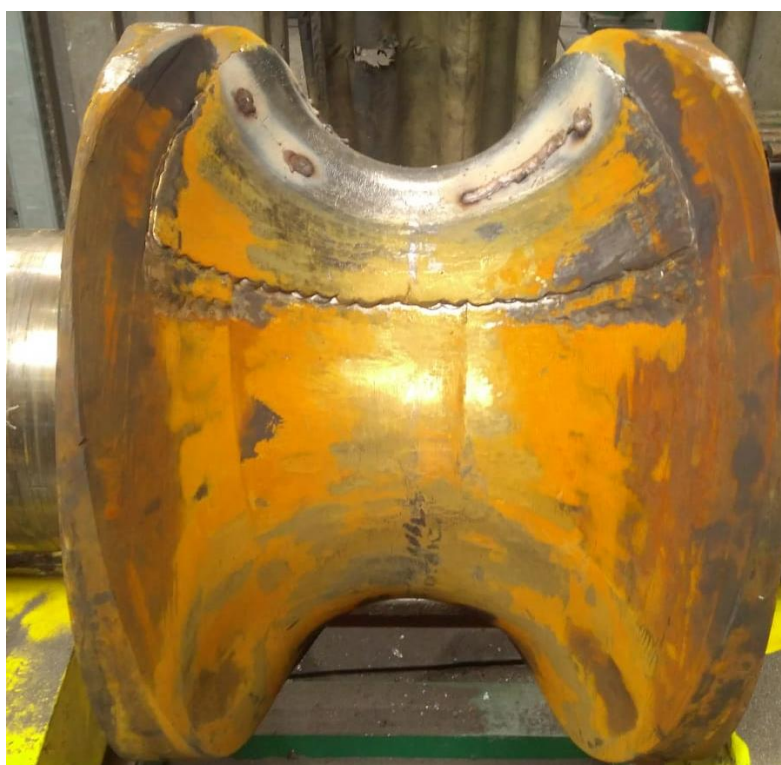
Na odcinku cylindrycznym walca następuje kalibracja i wygładzenie ścianki tulei. Powstała tuleja grubościenna ma wymiary średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 215$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 357$ oraz długość około $l = 2000$ mm. Przykład tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej z wyrwanym denkiem przedstawia rysunek 41.



Rysunek 41. Przykład tulei grubościennnej z wyrwanym denkiem

4.1.3 Określenie parametrów technologicznych walcowania rur w walcарce pielgrzymowej

W celu uzyskania zamierzonych wymiarów rur konieczne jest walcowanie wydłużające realizowane w walcарce pielgrzymowej na trzpieniu zamocowanym w zsynchronizowanym z walcarką aparacie podawczym. Walcarka z klatką roboczą posiada walce wykonane ze staliwa L45G o charakterystycznym, okresowo zmiennym profilu dostosowanym wymiarowo do gotowej rury, który można podzielić na dwie strefy: roboczą i jałową. W części roboczej następuje największe odkształcenie materiału, a tym samym wydłużenie rury, natomiast w części jałowej następuje kolejne podanie i obrót tulei o kąt zależny od średnicy i grubości ścianki walcowanej rury. W trakcie kampanii walcowniczej walce zużywają się i konieczna jest ich regeneracja przez napawanie i szlifowanie. Przykład walca w trakcie regeneracji po napawaniu przedstawiono na rysunku 42.



Rysunek 42. Przykładowy walec pielgrzymowy w trakcie regeneracji

Aparat podawczy współpracuje z walcarką w zakresie długości podania i kąta obrotu z umieszczoną na trzpieniu walcowaną tuleją, która wykonuje ruch posuwisto-zwrotny. Średnica trzpienia stanowi wymiar średnicy wewnętrznej produkowanej rury,

natomiast jego długość powinna być większa od długości produkowanej rury. Na rysunku 43 przedstawiono składowisko trzpieni.



Rysunek 43. Magazyn trzpieni w zakładzie przemysłowym

Tuleja grubościenna po procesie wydłużania z przebijaniem w skośnej walcarce wydłużającej podawana jest na stół walcarki pielgrzymowej. Do wnętrza wprowadzany jest ochłodzony w specjalnej kąpeli trzpień z naniesioną warstwą smaru ułatwiającego jego wysunięcie z wyprodukowanej tulei. Za pomocą aparatu tuleja grubościenna podawana jest w kierunku wykroju walców. Walce obracają się z prędkością

10 obr./min. w kierunku przeciwnym do przemieszczania się materiału i w momencie, w którym pozwala na to kształt wykroju (w części roboczej walców) następuje wprowadzenie wsadu pomiędzy walce. Podczas obrotu walca zmniejszający się jego wykroj powoduje odkształcanie materiału i przemieszczanie wsadu w kierunku walcowania. W ten sposób tuleja jest zakuwana na trzpieniu ($3 \div 5$ uderzeń) i tworzy się nierówny początek rury (strzęp). Po zakuciu następuje okresowe walcowanie właściwe. W części roboczej walców następuje gniot poprzeczny, a trzpień wraz z tuleją jest wycofywany o ściśle określoną długość w kierunku aparatu podawczego. Odległość wycofywania tulei jest uzależniona i zsynchronizowana z kształtem wykroju i prędkością obrotową walców. Następnie na odcinku jałowym aparat podawczy przesuwa do przodu tuleję wraz z trzpieniem i obraca ją o określony kąt, najczęściej o około 90° . Z każdym obrotem walców tuleja okresowo podawana jest do przodu i rozwałcowywana. Proces ten jest cykliczny i powtarza się do momentu rozwałcowania tulei. Podczas procesu trzpień zamocowany jest w uchwycie i zabezpieczony przed wypadnięciem przez specjalny element dociskany do aparatu przez końcówkę rury w całym etapie walcowania, nazywany tuleją oporową. W efekcie część materiału nie jest walcowana, ponieważ musi dociskać element zabezpieczający. Niedowalcowany kielich przed obróbką wykańczającą musi zostać odcięty. Gniot zależy od kształtu wykroju i w niewielkim stopniu regulowany jest prześwitem walców. Następnie ze stojaka wysuwana jest specjalna płyta oporowa, o którą opiera się kołnierz tulei oporowej aparatu podawczego. Poprzez wymuszenie ruchu powrotnego siłownikiem aparatu podawczego następuje zsunięcie tulei oporowej wraz z rurą, a nagrany w trakcie procesu trzpień poddawany jest chłodzeniu w wannie. Widok rury z kielichem bezpośrednio po zakończeniu procesu wydłużania przedstawiono na rysunku 44.



Rysunek 44. Widok rury z kielichem bezpośrednio po zakończeniu procesu wydłużania

Po wychłodzeniu temperatura trzpienia wynosi około 80 °C, co wydłuża czas jego eksploatacji. Po uniesieniu górnego walca (tzw. pusty przepust) rura wraz ze strzędem i kielichem jest transportowana samotokiem do piły tnącej w celu odcięcia odpadów technologicznych.

5. Badania numeryczne

Zastosowanie symulacji komputerowych bazujących na metodzie elementów skończonych stanowi istotną rolę w dziedzinie inżynierii i techniki. Umożliwia między innymi opracowanie geometrii narzędzi oraz analizę procesów technologicznych. Dzięki numerycznemu modelowaniu i ingerencji w właściwości materiałów oraz rozmieszczenie narzędzi możliwe jest wprowadzenie zmian w badanym procesie [25, 53]. W warunkach rzeczywistych jest to czaso- i kosztochłonne, a często nawet niemożliwe do zrealizowania.

Określenie schematu plastycznego płynięcia metalu w procesach przeróbki plastycznej jest zagadnieniem trudnym, szczególnie podczas walcowania wyrobów o skomplikowanym przekroju poprzecznym. W celu rozwiązania tego zagadnienia opracowano modele matematyczne oparte na metodzie elementów skończonych (MES), które umożliwiają odzwierciedlenie z dużą dokładnością rzeczywistych warunków procesów [25, 53]. Pierwsze modele zapewniające możliwość rozwiązywania rzeczywistych przypadków procesów walcowania w trójosiowym stanie odkształcenia datują się na drugą połowę lat osiemdziesiątych [43, 74]. Od tamtego czasu powstały trzy zasadnicze grupy modeli [4, 81, 124, 128]:

- sztywno – plastyczny model odkształcania materiału,
- lepko – plastyczny model odkształcania materiału,
- sprężysto – plastyczny model odkształcania materiału.

W modelowaniu procesów przeróbki plastycznej wyrobów stalowych na gorąco najczęściej stosowany jest model sztywno-plastyczny. Dokładność uzyskiwanych wyników obliczeń z zastosowaniem metod numerycznych jest ściśle uzależniona od przyjętych warunków brzegowych. Szczególny wpływ na otrzymane wyniki mają: właściwości badanej stali, warunki tarcia oraz parametry kinetyczne i termiczne opisujące proces walcowania. Obecnie istnieje wiele komercyjnych programów opartych na MES do numerycznego modelowania procesów przeróbki plastycznej w trójwymiarowym stanie odkształcenia. Jednym z nich jest program Forge NX firmy Transvalor [130]. Program oparty jest na metodzie elementów skończonych i przeznaczony do modelowania numerycznego procesów przeróbki plastycznej [10, 13, 16, 17, 19, 40, 42, 54, 58, 62, 69, 76, 99, 101, 103, 104, 106]. Może być użyty

m. in. do analizy procesu wytwarzania rur bezszwowych metodą pielgrzymową pod kątem określenia wpływu różnych parametrów technologicznych na cały proces wytwarzania rur. Do rozwiązywania zadań trójwymiarowego plastycznego płynięcia metalu program ten wykorzystuje model matematyczny, w którym stan mechaniczny odkształcanego materiału opisano za pomocą prawa Nortona-Hoffa [23, 70], które można wyrazić za pomocą równania:

$$S_{ij} = 2K(T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon)(\sqrt{3}\dot{\varepsilon})^{m-1}\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (1)$$

gdzie: S_{ij} - dewiator tensora naprężeń, $\dot{\varepsilon}$ - intensywność prędkości odkształcenia, $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - tensor prędkości odkształcenia, ε - intensywność odkształcenia, T - temperatura, K - konsystencja zależna od naprężenia uplastyczniającego σ_p , m - współczynnik charakteryzujący odkształcenie metalu na gorąco ($0 < m < 1$).

Warunki tarcia panujące na powierzchni kontaktu metalu i walców są opisane za pomocą modelu tarcia Coulomba [1, 5, 30, 86, 92, 111, 120] oraz modelu tarcia Treski [1, 5, 84, 56, 85, 87, 92, 111], w których przyjmuje się odpowiednie wartości współczynników:

$$\tau_j = \mu \cdot \sigma_n \quad dla \quad \mu \cdot \sigma_n < \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\tau_j = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad dla \quad \mu \cdot \sigma_n > m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

gdzie: τ_j – wektor jednostkowych sił tarcia, σ_0 – bazowe naprężenie, σ_n – naprężenie normalne, μ – współczynnik tarcia, m – czynnik tarcia.

Do wyznaczania pola temperatur wykorzystuje się równanie różniczkowe opisujące zmiany temperatury przy nieustalonym przepływie ciepła. Jest to równanie quasi-harmoniczne w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \left(Q - c_p \rho \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = 0 \quad (4)$$

W równaniu k_x , k_y oraz k_z to funkcje rozkładu anizotropowych współczynników przewodnictwa cieplnego w kierunkach x , y , z . T_s to funkcja, która opisuje temperaturę w rozpatrywanej strefie, Q to funkcja rozkładu prędkości generowania ciepła

odkształcania, a c_p to funkcja rozkładu ciepła właściwego metalu, natomiast ρ to funkcja rozkładu jego gęstości. Jako warunki brzegowe zostały przyjęte połączone warunki graniczne drugiego i trzeciego rodzaju, które można zapisać w postaci:

$$k_x \frac{\partial T_s}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T_s}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T_s}{\partial z} l_z + q + \alpha_k T_s = 0 \quad (5)$$

W równaniu tym l_x , l_y i l_z są cosinusami kierunkowymi normalnej do powierzchni pasma, q jest natężeniem przepływu ciepła na powierzchni strefy chłodzonej, a α_k przedstawia straty konwekcyjne. Równanie (4) i warunek brzegowy (5) jednoznacznie określają wymianę ciepła podczas modelowania procesu walcowania [60]. Dokładność obliczeń numerycznych zależy od dokładności i zbieżności przyjętych warunków materiałowych oraz brzegowych charakterystycznych dla procesu. W badaniach numerycznych opis reologiczny badanej stali S235 przyjęto z bazy materiałowej zawartej w programie. Model ten został wielokrotnie zweryfikowany w badaniach prowadzonych między innymi przez pracowników Politechniki Częstochowskiej [8, 11, 12, 51, 98].

Do numerycznych badań przyjęto następujące parametry kinetyczne i warunki brzegowe:

- współczynnik tarcia 0,35
- emisyjność 0,82;
- gęstość stali 7 850 kg/m³;
- ciepło właściwe 778 J/(kg·K);
- współczynnik przewodności cieplnej 35,5 W/(m·K);

Powyższe wartości zostały dobrane oparciu o literaturę oraz wyniki badań prowadzonych w Politechnice Częstochowskiej [11, 12, 51, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 93]. Istotne jest także, aby temperatura osprzętu walcowniczego na każdym z etapów produkcyjnych rur bez szwu były możliwie jak najbardziej zbliżone do warunków procesu rzeczywistego, zatem symulacje numeryczne wykonano w oparciu o dane technologiczne zakładu przemysłowego.

5.1 Przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową

Do przeprowadzenia badań numerycznych konieczne jest zbudowanie cyfrowych modeli materiałowych oraz narzędzi biorących udział w poszczególnych etapach procesu. Odpowiednie ich rozmieszczenie i wzajemne ustawienie w przestrzeni pozwolą na budowę modeli geometrycznych każdego etapu tej techniki wytwarzania, a następnie przeprowadzenie badań numerycznych procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową oraz analizę uzyskanych wyników. Elementy te zaprojektowano przy pomocy programów AutoCad® oraz Rhinoceros 4.0 przeznaczonych do wspomagania prac inżynierskich, w tym do projektowania, opisywania i modelowania figur przestrzennych oraz wizualizacji procesów w systemie dwu- i trójwymiarowym [121, 129].

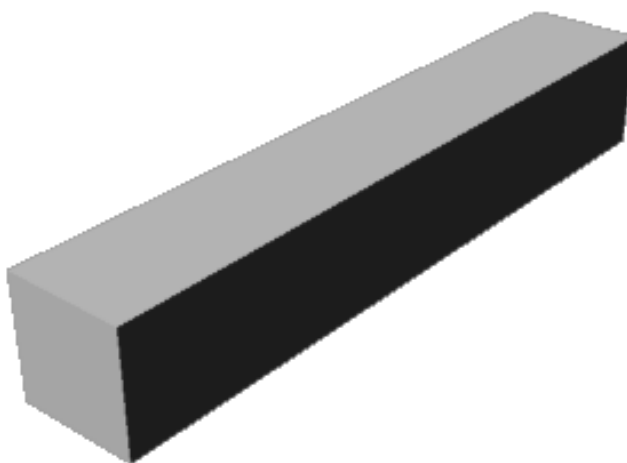
5.2 Budowa modeli geometrycznych

Na podstawie analizy rzeczywistego procesu wytwarzania rury z kielichem o wymiarach $\varnothing_1 = 177$ mm, $\varnothing_2 = 205$ mm i długości około $l = 15300$ mm metodą pielgrzymową oraz instrukcji technologicznych poszczególnych etapów procesu zbudowano modele geometryczne:

- wsadu,
- prasy przebijającej,
- skośnej walcarki wydłużającej,
- walcarki pielgrzymowej.

Wsad

Model wsadu przygotowano jako prostopadłościan o przekroju 280×280 mm² i długości $L = 1650$ mm. Rysunek 45 przedstawia zamodelowany wsad do symulacji numerycznych procesu walcowania rur bezszwowych metodą pielgrzymową.



Rysunek 45. Model przestrzenny wsadu do prasy przebijającej

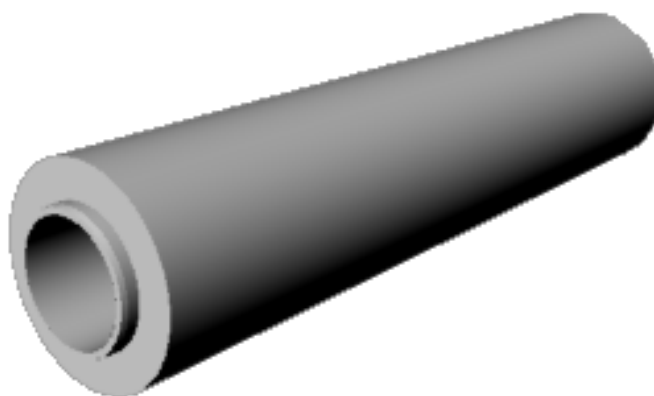
Model geometryczny prasy przebijającej

Elementami składowymi modelu geometrycznego niezbędnego do zamodelowania procesu wyciskania na prasie są:

- matryca,
- główka przebijaka,
- wypychacz.

Matryca

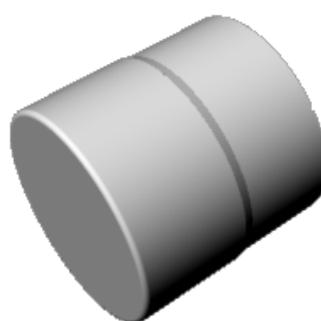
Model matrycy zbudowano jako stożkową bryłę obrotową o długości $L = 2150$ mm i wewnętrznych średnicach $\varnothing_1 = 418$ mm i $\varnothing_2 = 428$ mm. Na rysunku 46 przedstawiono model przestrzenny matrycy. W dolnej części widoczny jest pierścień, który w rzeczywistości współpracuje z powierzchnią wypychacza umożliwiającą wysunięcie przedziurowanej tulei grubościennej z dnem z matrycy.



Rysunek 46. Model przestrzenny matrycy prasy przebijającej

Główka przebijaka

Elementem współpracującym z matrycą podczas wyciskania tulei jest główka przebijaka, która została pokazana na rysunku 47. Jej model stanowi bryłę obrotową o średnicach $\varnothing = 215/210$ mm i długości $l = 210$ mm.



Rysunek 47. Model przestrzenny główki przebijaka prasy przebijającej

Wypychacz

W celu skrócenia czasu obliczeń wypychacz, który w praktyce jest chłodzonym walcem został przygotowany w postaci krążka o średnicy $\varnothing = 460$ mm i grubości $d = 50$ mm. Widok modelu wypychacza przedstawiono na rysunku 48.



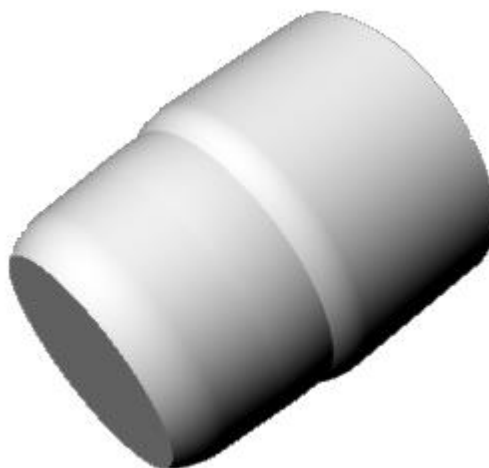
Rysunek 48. Model przestrzenny wypychacza prasy przebijającej

Model geometryczny skośnej walcarki wydłużającej

Elementami składowymi skośnej walcarki wydłużającej są dwa beczkowato - stożkowe walce z progiem (występem), główka dziurująca, popychacz i ława. Wsad do walcowania stanowi tuleja grubościenna będąca wynikiem modelowania procesu wyciskania w prasie.

Walec

Model walca został opracowany jako stożkowa bryła obrotowa o długości całkowitej $L = 900$ mm i średnicach części stożkowej $\varnothing_1 = 570/620$ mm i części cylindrycznej o średnicy $\varnothing_2 = 755$ mm. Zastosowano promienie zaokrągleń na początku walca w celu ułatwienia wprowadzania wsadu oraz pomiędzy częścią stożkową i cylindryczną (strefą najintensywniejszego odkształcania), gdzie promień zaokrągleń $r = 133$. Przestrzenny model walca skośnej walcarki wydłużającej zaprezentowano na rysunku 49.



Rysunek 49. Model przestrzenny walca skośnej walcarki wydłużającej

Główka dziurująca

Narzędziem odpowiedzialnym za kształtowanie wewnętrznej średnicy tulei jest główka dziurująca, której model przedstawiono na rysunku 50. Została zbudowana jako stożkowo - cylindryczna bryła obrotowa o średnicy $\varnothing = 215$ mm, długości $l = 286$ mm i zmiennym profilu zaokrąglenia.



Rysunek 50. Model przestrzenny główki dziurującej skośnej walcarki wydłużającej

Popychacz

W praktyce chwyt metalu przez walce jest wynikiem oddziaływania sił tarcia pomiędzy materiałem a walcami. Przy opracowywaniu modeli geometrycznych procesów walcowania na gorąco należy zastosować dodatkowe narzędzie niewystępujące w procesie przemysłowym, a którego zadaniem jest ułatwienie chwytu. Element ten bierze udział tylko w początkowym etapie symulacji i nie ma wpływu na wyniki uzyskane w ustalonym procesie walcowania. Popychacz przedstawiono na

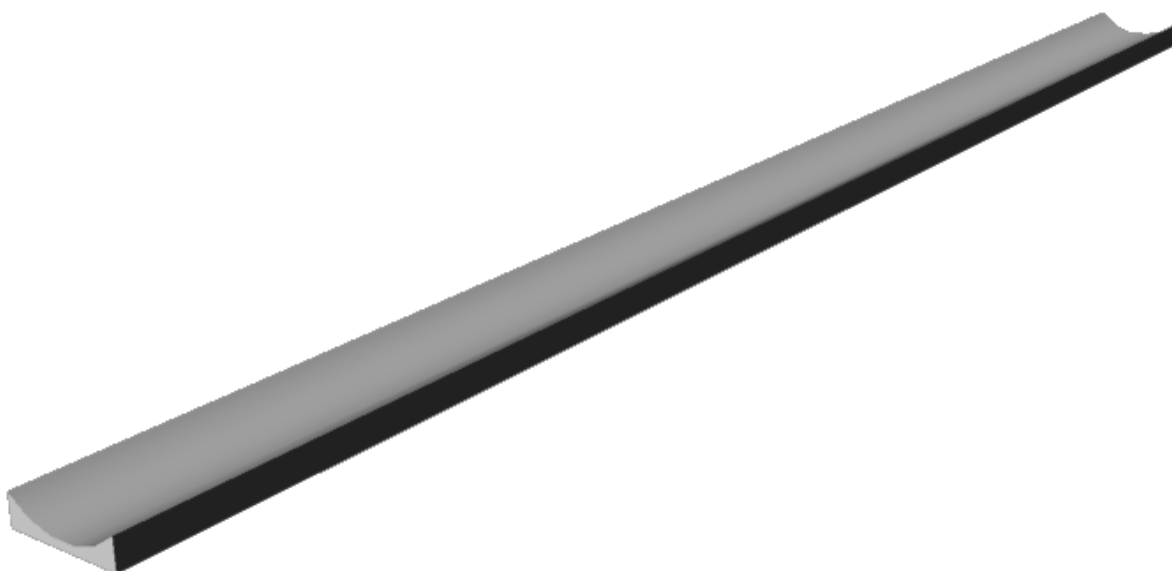
rysunku 51. Został przygotowany jako płaszczyzna o średnicy $\varnothing = 686$ mm grubości $d = 50$ mm.



Rysunek 51. Model przestrzenny wypychacza skośnej walcarki wydłużającej

Ława

Na podstawie analizy symulacji wstępnych i doświadczeń własnych konieczne okazało się zastosowanie dodatkowego elementu układu - ławy, który w rzeczywistym procesie przemysłowym również nie występuje. Element ten przedstawiony na rysunku 52 i jest odpowiedzialny za podtrzymanie tulei, aby podczas kontaktu z walcem ograniczyć ewentualne błędy wynikające z kontaktu modeli wsadu i walców. Dzięki takiemu rozwiązaniu tuleja została utrzymana w osi walcowania do momentu osiągnięcia ustalonego stanu walcowania. Ława ma długość $L = 3500$ mm, szerokość $l = 300$ mm, wysokość $w = 77$ mm i promień zaokrąglenia $r = 218$ mm.



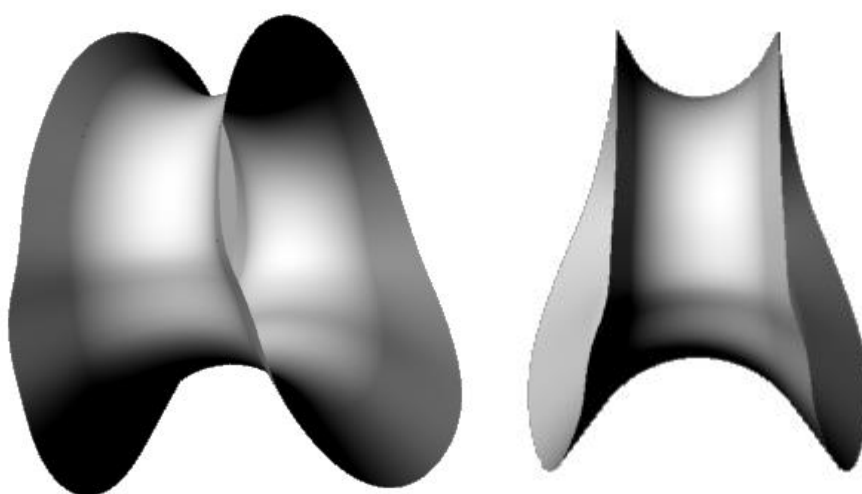
Rysunek 52. Model przestrzenny ławy w skośnej walcarce wydłużającej

Model geometryczny walcarki pielgrzymowej

Elementami składowymi walcarki pielgrzymowej są dwa walce i trzpień.

Walec pielgrzymowy

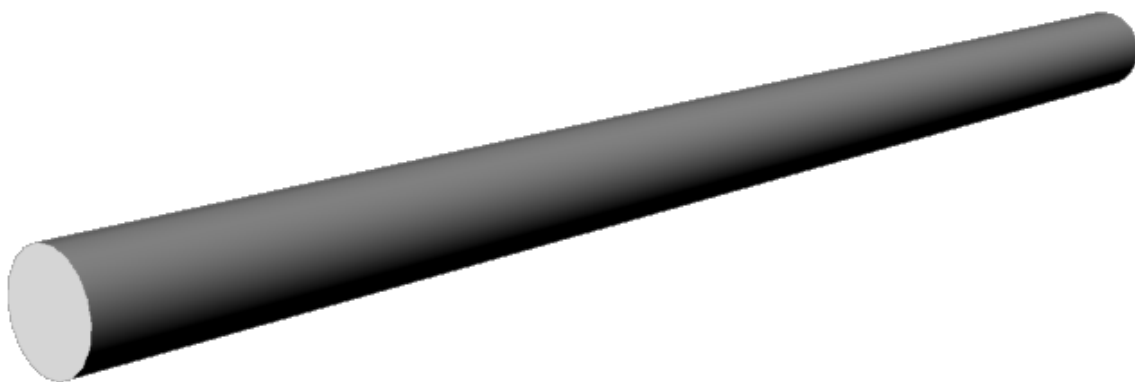
Walec o charakterystycznym zmiennym profilu na obwodzie został zaprojektowany poprzez połączenie punktów konstrukcyjnych za pomocą powierzchni. Na podstawie dokumentacji technicznej zostały odwzorowane wymiary w modelu geometrycznym walca, który przedstawiono na rysunku 53. Rozwiązanie takie nie miało wpływu na przebieg procesu, a znacznie przyspieszyło czas obliczeń.



Rysunek 53. Model przestrzenny walca pielgrzymowego

Trzpień

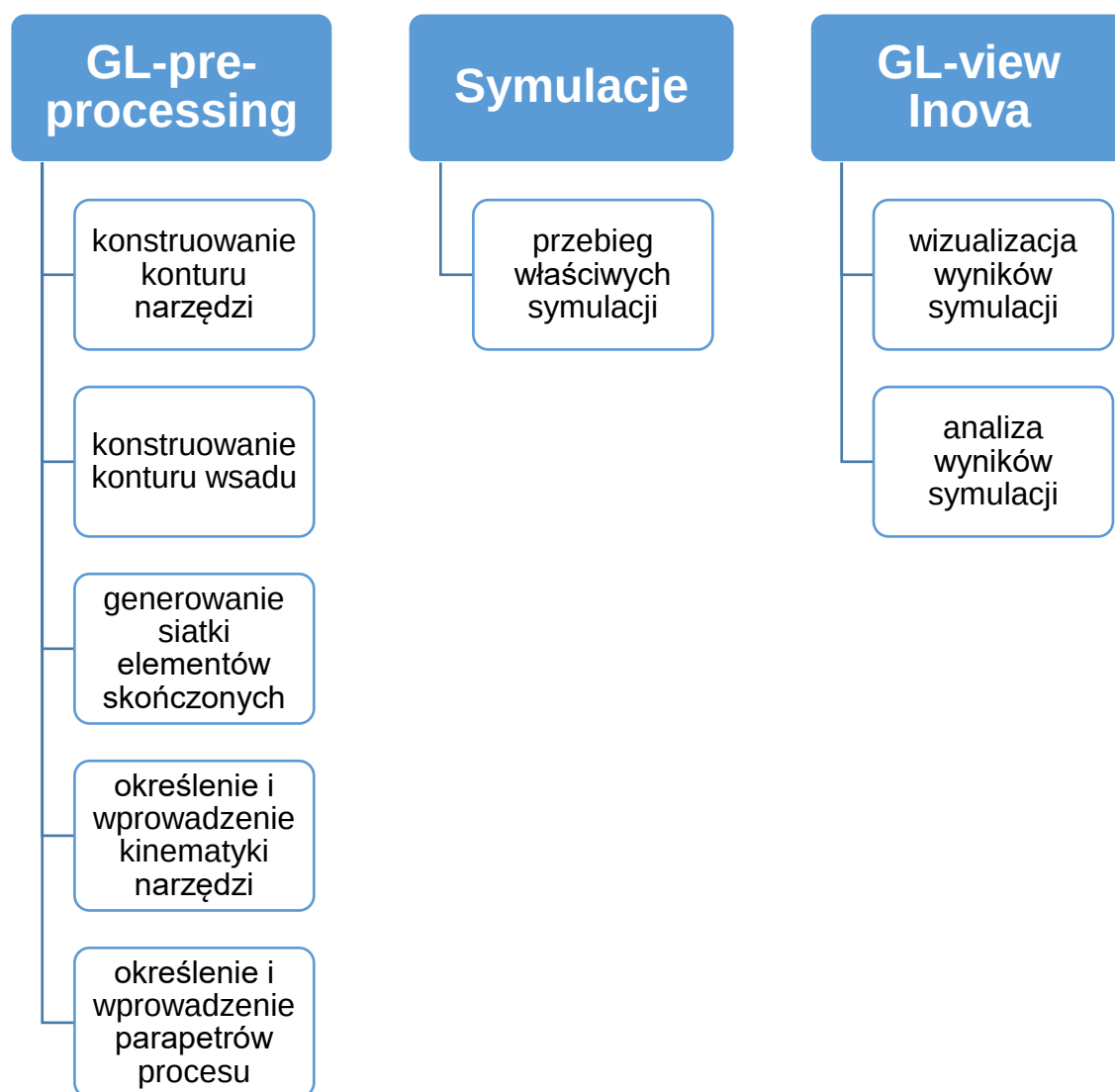
Trzpień wprowadzany jest do wnętrza rury i jego zadaniem jest kształtowanie wewnętrznej powierzchni i kontrolowanie wymiarów średnicy wewnętrznej gotowej rury. Jest walcem o promieniu $r = 88,9 \text{ mm}$ i długości $L = 3000 \text{ mm}$, a jego model przedstawiono na rysunku 54.



Rysunek 54. Model przestrzenny trzpień walcarki pielgrzymowej

5.3 Metodyka prowadzonych badań numerycznych

Pakiet programu Forge NX składa się z kilku modułów, m.in.: GL-pre-processing, symulacji i GL-view Inova. Na rysunku 55 przedstawiono moduły programu Forge NX ze szczegółowym opisem przebiegu danego etapu [110].



Rysunek 55. Schemat blokowy modułów programu Forge NX

W rozdziale 4.1 opisano przebieg rzeczywistego procesu wytwarzania rur z kielichem metodą pielgrzymową. Zaprojektowane w programie AutoCAD® i Rhinoceros 4.0 wsad oraz elementy składowe urządzeń wraz z osprzętem z wygenerowaną powierzchnią siatką elementów skończonych zostały eksportowane do modułu GL-pre-processing programu Forge NX, w którym zostały ustawione parametry symulacji dla poszczególnych etapów procesu:

- przebijanie na prasie przebijającej,
- dziurowanie z wydłużaniem w skośnej walcарce wydłużającej,
- wydłużanie w walcарce pielgrzymowej.

5.3.1 Określenie parametrów symulacji

Do obliczeń numerycznych procesu walcowania pielgrzymowego rur bezszwowych konieczne jest wprowadzenie wartości parametrów początkowych takich jak temperatura materiału i narzędzi, prędkość walcowania oraz współczynniki tarcia i wymiany ciepła pomiędzy walcami a materiałem. Dla efektywnego rozwiązania postawionego zadania wprowadzono uproszczenia, które zdaniem autora nie wpłynęły na dokładność rozwiązania, a skróciły czas obliczeń i ułatwiły prowadzenie samych symulacji. W obliczeniach pominięto wymianę ciepła wsadu i osprzętu z narzędziami, które zastosowano tylko na potrzeby modelowania procesu, a które nie występują w procesie przemysłowym.

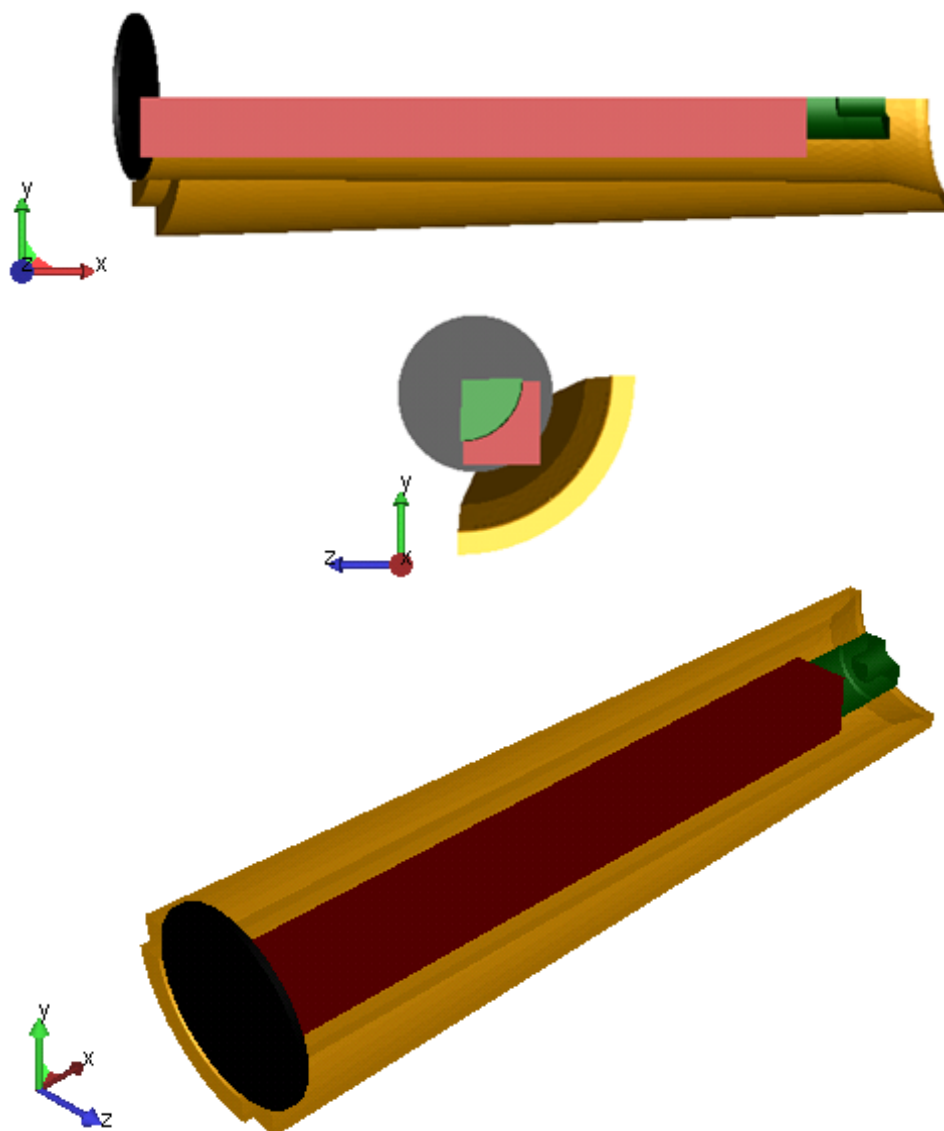
Proces komputerowych symulacji wytwarzania rur bezszwowych podzielono na trzy etapy, zgodnie z rzeczywistą technologią przemysłową. Pierwszy to wyciskanie tulei grubościennej z dnem z wlewka kwadratowego na prasie przebijającej. W drugim etapie przeprowadzono wydłużanie wyciśniętej tulei w skośnej walcarce wydłużającej i wyrwanie denka. Ostatni etap polega na wydłużaniu w walcarce pielgrzymowej tulei bez dna odwalcowanej w alongatorze.

5.3.2 Przebijanie na prasie przebijającej

Przeprowadzono symulacje komputerowe wyciskania przeciwbieżnego, czyli przebijania wlewka na prasie poziomej. W module GL-pre-processing programu FORGE NX rozmieszczono narzędzia według instrukcji technologicznej.

Materiał wsadowy stanowił wlewek, którego szczegóły opisano w rozdziale 5.2. Na podstawie literatury [18, 97, 102, 105] wygenerowano na nim objętościową siatkę elementów skończonych

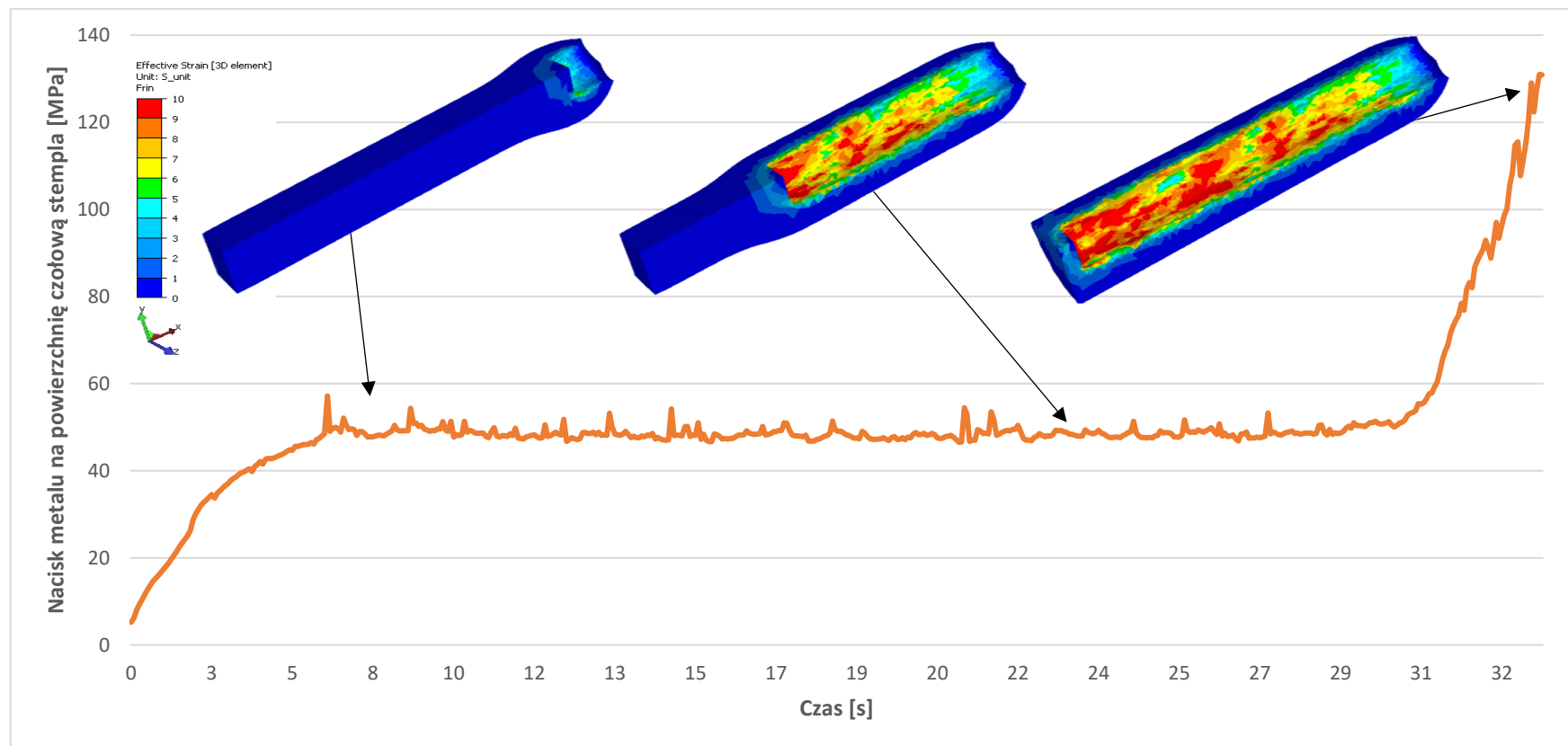
Z uwagi na to, że proces wyciskania wlewka realizowany jest w układzie osiowo-symetrycznym, w celu skrócenia czasu obliczeń przeprowadzono symulację tylko dla $\frac{1}{4}$ wsadu, uwzględniając dwie płaszczyzny symetrii. Na rysunku 56 przedstawiono układ geometryczny procesu wyciskania tulei na prasie przebijającej.



Rysunek 56. Widok geometrii materiału i narzędzi użytych do analizy procesu wyciskania tulei grubościennnej na prasie przebijającej

Na rysunku 57 przedstawiono wykres zależności nacisku metalu na powierzchnię czołową stempla w czasie w procesie wyciskania na prasie tulei grubościennnej z dnem. Analizując dane symulacji, które przedstawiono na rysunku można stwierdzić, że w początkowej fazie wyciskania materiał rozchodzi się na boki pod wpływem nacisku stempla. Po około 5 sekundach stempel zagłębia się w materiale, a matryca wypełniana jest metalem. W kolejnych sekundach następuje stabilizacja procesu i nacisk metalu na powierzchnię czołową stempla mieści się

w zakresie $45 \div 60$ MPa. Po upływie około 30 sekund następuje gwałtowny wzrost sięgający nawet 130 MPa wynikający z kształtowania denka.

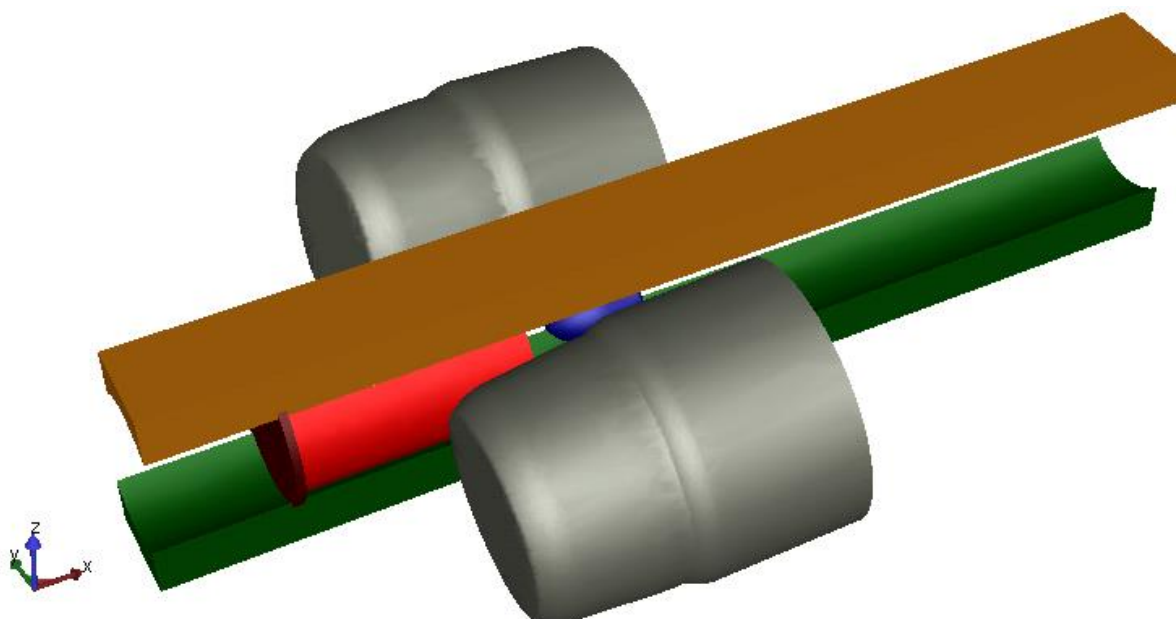


Rysunek 57. Wykres zależności nacisku metalu na powierzchnię czołową stempla w czasie procesu wyciskania na prasie tulei grubościenniej z dnem

5.3.3 Dziurowanie z wydłużaniem w skośnej walcarce wydłużającej

W celu analizy procesu dziurowania z wydłużaniem tulei grubościennych z dnem w skośnej walcarce wydłużającej przeprowadzono numeryczne symulacje walcowania. Ze względu na złożoność analizowanego zagadnienia realizowane były w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. Program Forge NX umożliwia transport wyników odkształconej siatki elementów skończonych, dzięki temu w module GL-pre-processing możliwe było wyeksportowanie powstałej $\frac{1}{4}$ tulei grubościennych z dnem z ostatniego etapu przebijania na prasie do początku symulacji procesu dziurowania z wydłużaniem w skośnej walcarce wydłużającej. Ze względu na uproszczenia symulacji procesu wyciskania wynikające z osiowo-symetrycznego podejścia do zagadnienia niezbędne było złożenie wsadu do walcowania wydłużającego w jedną całość składającą się z czterech jednakowych fragmentów uzyskanych w poprzednim etapie odkształcania tworzących tuleję grubościenną z dnem. Wraz z opisem geometrycznym wyeksportowano historię odkształcenia materiału. Podobnie jak w poprzednim etapie przyjęto dla materiału model odkształcanego lepko – plastyczny wg Nortona – Hoffa [32, 70]. Walce beczkowato – stożkowe i główkę dziurującą zamodelowano jako sztywne elementy. Dodatkowo wprowadzono popychacz zapewniający poprawne wprowadzenie tulei w przestrzeń między walcową i ułatwienie chwytu metalu przez walce oraz dwie ławy, które w podczas walcowania w stanie ustalonym zapewniają poprawne prowadzenie wsadu w osi walcowania.

Zgodnie z danymi zawartymi w literaturze [88], aby można było poprawnie analizować wyniki symulacji długość materiału wprowadzonego do kotliny odkształcenia powinna być co najmniej trzykrotnie większa od jej długości. W celu skrócenia czasu obliczeń zastosowano wsad do skośnej walcarki o wymaganej długości z zachowaniem części z dnem. Na rysunku 58 przedstawiono złożenie składowych procesu walcowania w skośnej walcarce wydłużającej.



Rysunek 58. Złożenie składowych procesu walcowania w skośnej walcarce wydłużającej

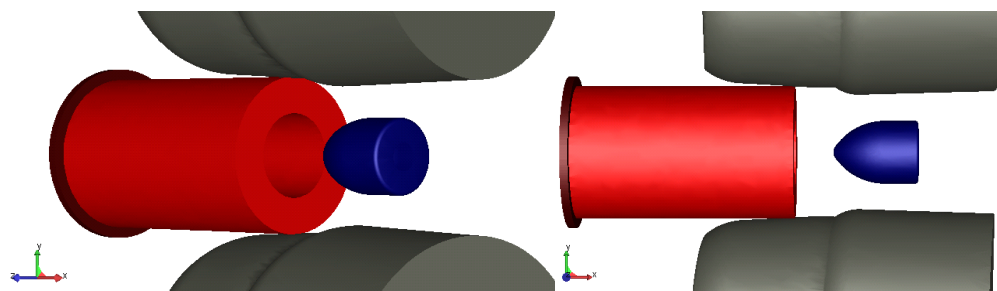
W badaniach przyjęto kąty rozwałcowania i zukosowania oraz położenie główki dziurującej względem progu walców zgodne z instrukcją technologiczną zakładu produkcyjnego. Dla analizowanej technologii walcowania kąt rozwałcowania α przyjmuje wartości $\alpha = 3^\circ$, a kąt zukosowania $\beta = 5^\circ$.

W przypadku współpracy powierzchni pasma z powierzchniami walców zastosowano złożony model tarcia i dla wartości naprężeń normalnych do powierzchni narzędzia nie mniejszych niż wartość naprężenia uplastyczniającego materiału. Zastosowano model zgodny z zależnościami Treski przyjmując czynnik tarcia wynoszący (0,3), natomiast dla naprężeń normalnych na powierzchni narzędzia mniejszych od wartości naprężenia uplastyczniającego model Coulomba i współczynnik tarcia (0,15).

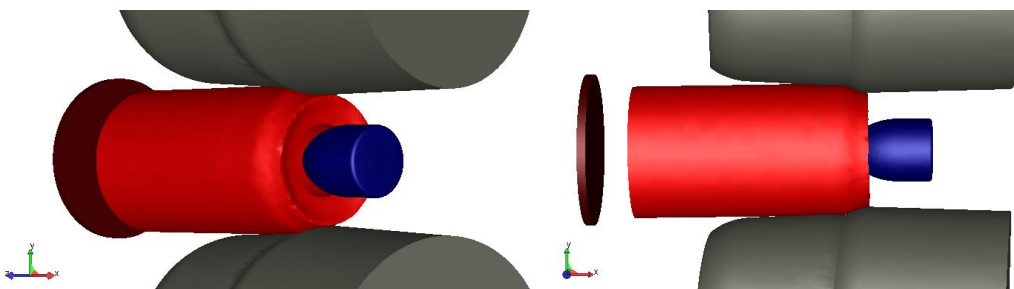
Na podstawie wykonanych obliczeń przeanalizowano fazy walcowania w walcarce skośnej. Fazy te zostały przedstawione na rysunku 59, na którym dla poprawy czytelności wyłączono widok prowadnic.

Czas
[s]

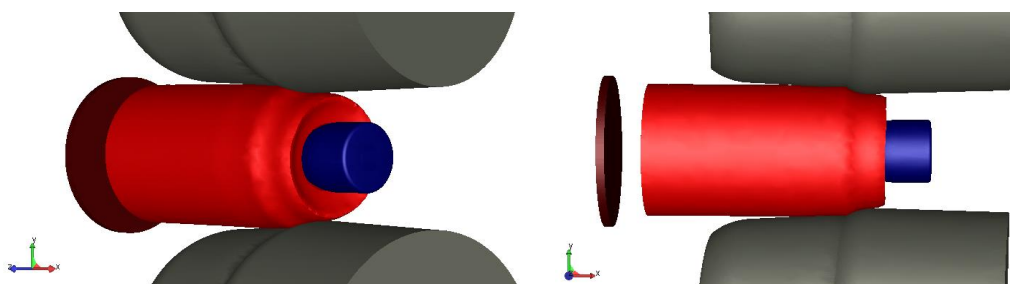
a) 0



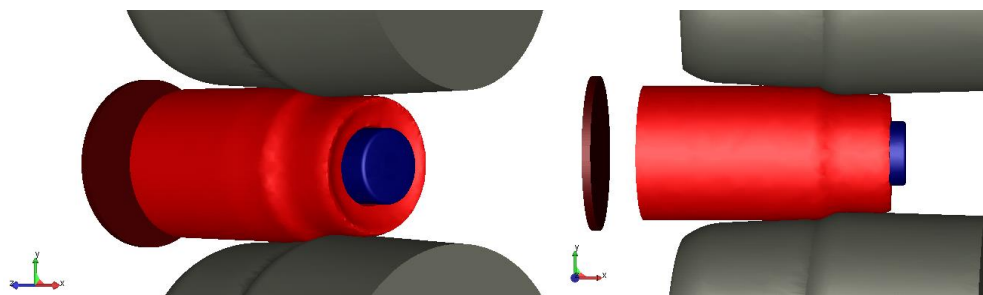
b) 1



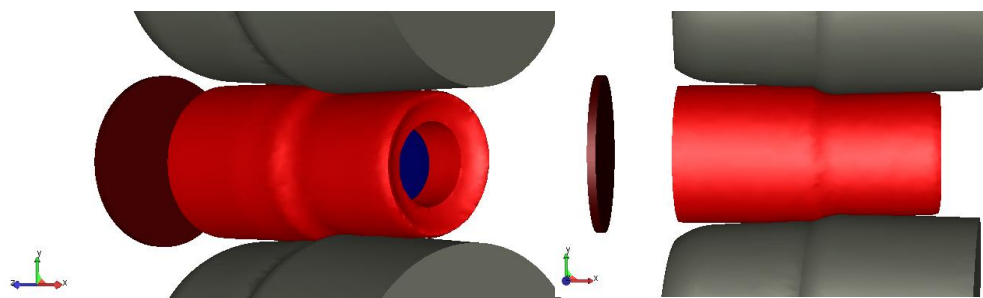
c) 2

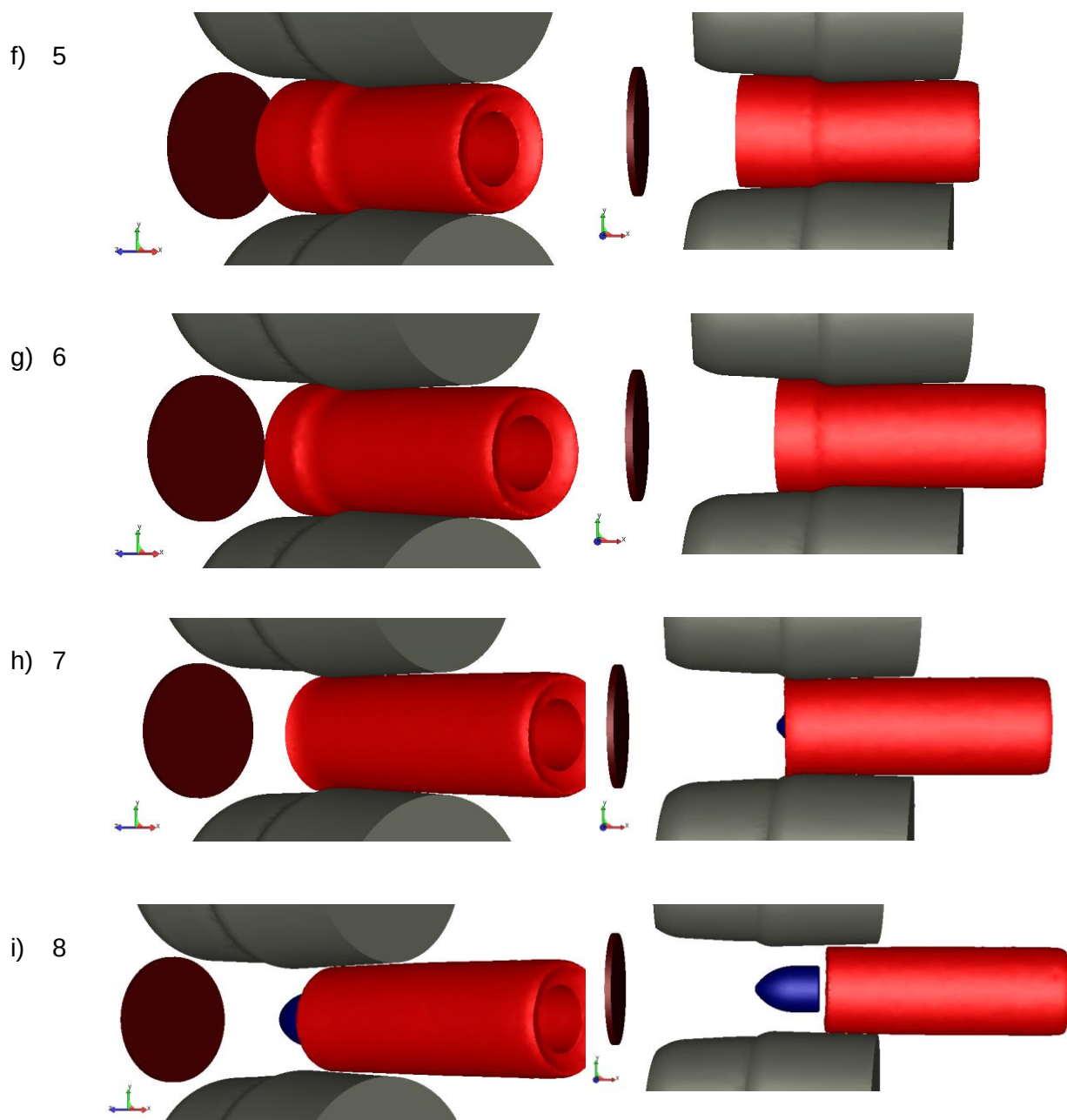


d) 3



e) 4

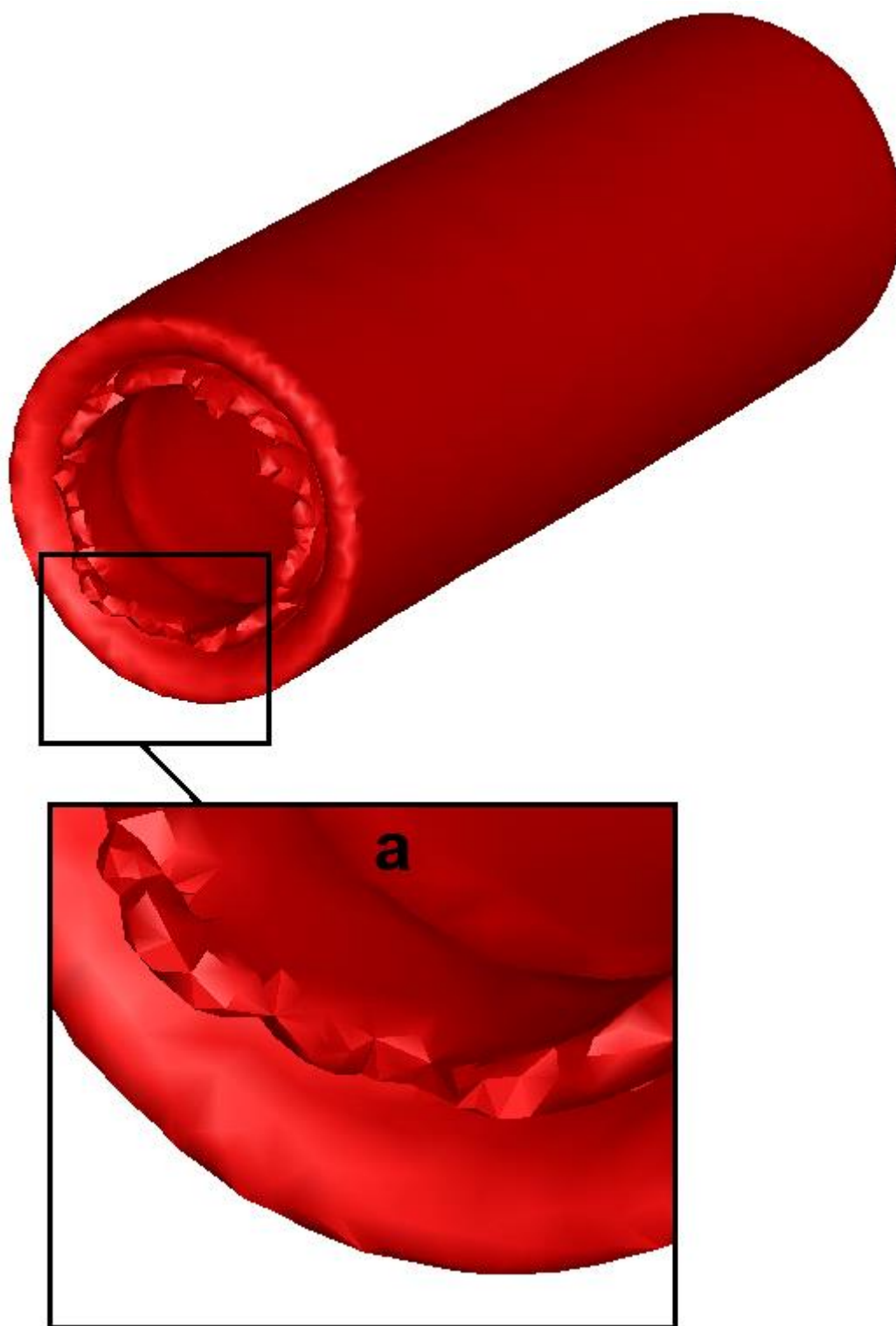




Rysunek 59. Poszczególne fazy walcowania w walcarce skośnej

Proces rozpoczyna się od dosunięcia przez popychacz tulei do walców, gdzie następuje jej chwyt (rys. 59a). W wyniku działania sił tarcia walce wprawiają materiał w ruch obrotowy i przemieszczają go osiowo w kierunku walcowania (rys. 59b). Następnie materiał naprowadzany jest na główkę dziurującą (rys. 59c) i rozpoczyna się kształtowanie otworu wewnętrznego tulei, którego wymiar określa średnica główki. Proces osiąga stan stabilny i ustalony po wypełnieniu całej kotliny odkształcenia (rys. 59d ÷ 59f). Popychacz po dosunięciu wsadu do kotliny odkształcenia i chwycie

metal przez walce nie bierze udziału w dalszym procesie. W etapie końcowym następuje dziurowanie (rys. 59g ÷ 59h), gdy główka wyrywa denko z grubościenną tulei. Rysunek 59i przedstawia tuleję grubościenną po wyrwaniu denka. Na podstawie danych literaturowych [14, 20, 27, 31, 48, 49, 50, 68, 75, 91, 96, 97, 100, 113] dla analizowanego zakresu temperatur wsadu oraz zakresu prędkości odkształcenia do modelowanego procesu walcowania z wyrwaniem denka wartość znormalizowanego kryterium Cockrofta – Lathama przyjęto $C_{CL_zn} = 1.5$. Po procesie walcowania trzymano tuleję grubościenną o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 215$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 357$ mm. Na rysunku 60 przedstawiono tuleję z wyrwanym denkiem. Kształt jaki powstał w wyniku symulacji numerycznych procesu wytwarzania tulei grubościenną bez dna jest zbliżony do rzeczywistego (rys. 41).



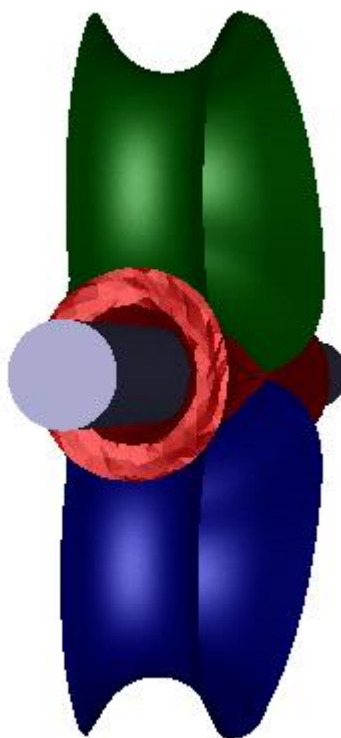
Rysunek 60. Tuleja grubościenna bez dna otrzymana po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej

Na rysunku 60 widoczna jest wydłużona warstwa wewnętrzna oraz pierścień wewnątrz tulei (szczegół a) będący wynikiem kształtowania i wyrwania denka.

5.3.4 Wydłużanie w walcierce pielgrzymowej

Ostatnim analizowanym etapem procesu wytwarzania rur bez szwu było wydłużanie tulei bez dna w walcierce pielgrzymowej. Symulacje realizowano w przestrzennym stanie odkształcenia. Zamodelowano trzpień oraz dwa walce pielgrzymowe, które zdefiniowano jako ciała sztywne. Odkształcona siatka elementów skończonych opisująca tuleję po procesie wydłużania w skośnej walcierce została wyeksportowana jako wsad do procesu walcowania pielgrzymowego. Na rysunku 61 przedstawiono widok geometrii materiału i narzędzi użytych do modelowania procesu wydłużania w walcierce pielgrzymowej.

Ze względu na złożoność tego etapu produkcji wynikającą z obracania się walców i ich zmiennego profilu na obwodzie do walcowania przyjęto tylko części tulei grubościennnej obejmującej końcówkę z wyrwanym denkiem o długości umożliwiającej w późniejszym etapie analizę wyników uzyskanych w stanie ustalonym procesie.



Rysunek 61. Złożenie składowych procesu walcowania w walcierce pielgrzymowej

Walce, trzpień i wsad ustawiono w przestrzeni zgodnie z instrukcją technologiczną, tak aby szczelina walcownicza umożliwiła zakucie początku tulei na trzpieniu oraz walcowanie do momentu uzyskania rury o wymaganych wymiarach. Walce obracały się w przeciwnym kierunku z jednakową prędkością obrotową

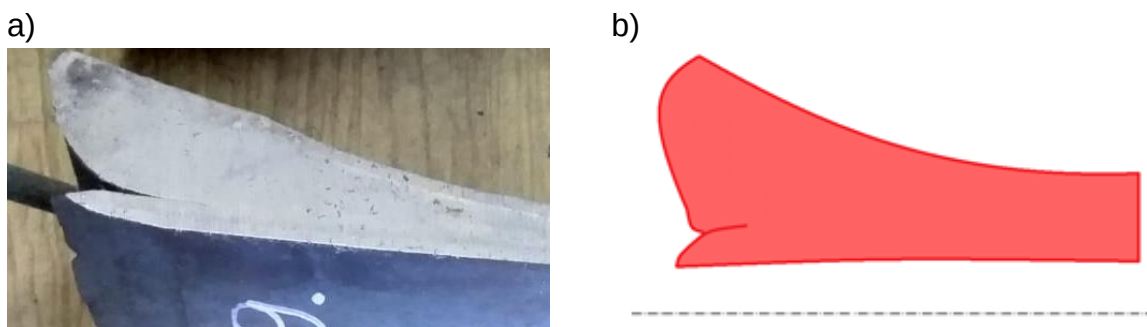
wynoszącą 10 obr./min. W symulacjach uwzględniono również obrót rury z trzpieniem w trakcie ruchu jałowego. W praktyce ruch ten wymuszany jest przez obrotnicę, a jego celem jest uzyskanie równomiernej grubości ścianki na przekroju poprzecznym. Na podstawie danych praktycznych i wyników wstępnych symulacji przyjęto kąt obrotu trzpienia równy 92° .

W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano rurę surową z kielichem o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 177$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 205$ mm, przedstawioną na rysunku 62.



Rysunek 62. Rura surowa z kielichem otrzymana w wyniku symulacji numerycznych metodą walcowania pielgrzymowego

Kształt rury otrzymanej w wyniku symulacji komputerowych jest zbliżony do rury wytworzonej w rzeczywistym procesie, którą przedstawiono na rysunku 31. Na rysunku 63 przedstawiono przykładowy rzeczywisty fragment przekroju kielicha powstającego po walcowaniu pielgrzymowym dla obecnie stosowanej technologii (rys. 63a) oraz część przekroju rury uzyskanej w wyniku symulacji komputerowej rzeczywistego procesu jej wytwarzania (rys. 63b). Zawalcowania widoczne w kielichu rury surowej są obserwowane również na przekroju rury uzyskanej w wyniku symulacji numerycznej. Na tej podstawie stwierdzono, że warunki temperaturowo – odkształceniowe, wartości czynnika i współczynnika tarcia zostały dobrane prawidłowo.



Rysunek 63. Rzeczywisty fragment przekroju kielicha powstającego po walcowaniu pielgrzymowym dla obecnie stosowanej technologii oraz część przekroju rury uzyskanej w wyniku symulacji komputerowej rzeczywistego procesu jej wytwarzania

Doświadczenie przemysłowe zdobyte w trakcie stażu w walcowni pielgrzymowej rur Alchemia S.A. oddział Rurexpol w 2020 roku oraz analiza wyników symulacji pozwoliły stwierdzić, że podczas walcowania pielgrzymowego rur bezszwowych z kielichem jego kształt nie jest uzależniony od wydłużania rury w walcarce pielgrzymowej. Zakres sterowania procesem na tym etapie ogranicza się tylko do wprowadzenia rury w wykrój walców, ustalenie kąta obrotu trzpienia z umieszczoną na nim rurą oraz długości podania rury do wykroju. Niewłaściwie dobrana długość wsunięcia powoduje wadę w postaci efektu „bambusa” lub zmniejszenie wydajności procesu. Natomiast obrót trzpienia wraz z rurą o kąt 89° lub 91° , zapobiega powstawaniu wypłytki na ścianie zewnętrznej rury. Na kształt kielicha i jego wady wpływa jedynie sposób płynięcia materiału oraz końcówka rury, która jest wytwarzana w walcarce skośnej wydłużającej podczas wrywania denka, w efekcie którego pozostaje charakterystyczny pierścień, widoczny na rysunku 60.

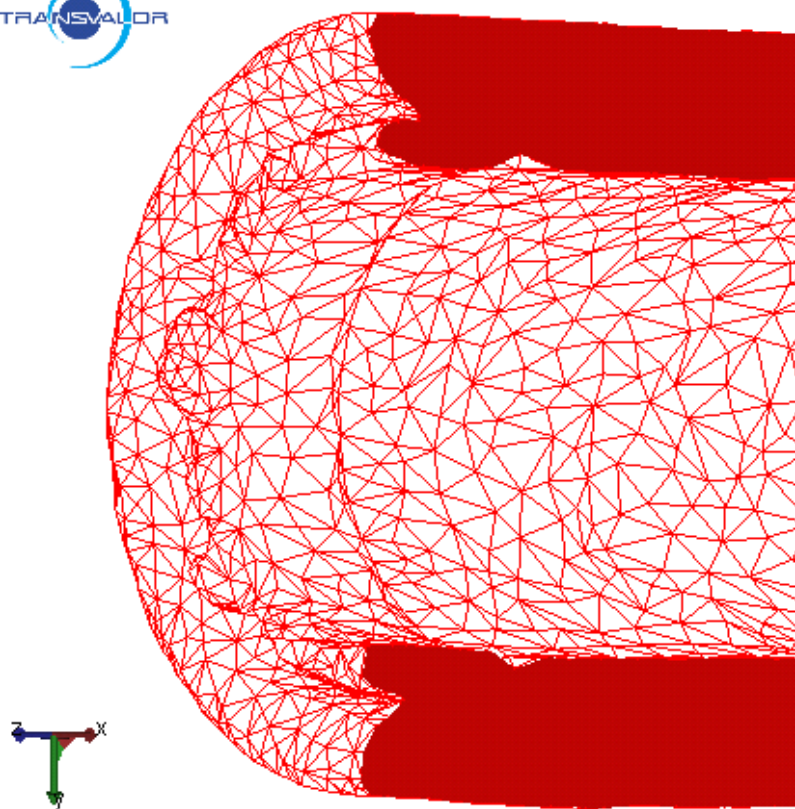
Im pierścień jest płytszy i bardziej rozciągnięty tym łatwiej jest go rozwałcować w walcarce pielgrzymowej. Przy znacznej jego głębokości walcowanie na trzpieniu pozostaje zagłębienie i stanowi niezgodność kształtu powodując konieczność usunięcia (odcięcia) końcówki rury wraz z tą wadą. Analiza wyników badań numerycznych wykazała, że nie ma możliwości całkowitego wyeliminowania pierścienia bez zastosowania na etapie wyciskania tulei dodatkowego zabiegu wycinania denka. Analizując proces walcowania stwierdzono, że możliwe jest jednak wymuszenie takiego płynięcia metalu podczas kształtowania rury, który wpłynie na zmianę geometrii pierścienia oraz jego odległość od końca rury. Uzyskanie pierścienia płytszego i krótszego w wyniku walcowania na walcarce skośnej dziurującej będzie skutkowało łatwiejszym jego rozwałkowaniem podczas procesu pielgrzymowego.

Z kolei jego przesunięcie w kierunku końca rury w skrajnych przypadkach (braku możliwości jego rozwałcowania np. wynikający z małej grubości ścianki) może zmniejszyć odpad technologiczny (skrócić odcinaną część).

5.4 Proces bezkielichowego wytwarzania rur metodą pielgrzymową

Przeprowadzone próby technologiczne dowałcowania kielicha umożliwiły zwiększenie długości rury surowej, jednak podczas badania z zastosowaniem urządzenia ultradźwiękowego wykryto wady wewnętrzne w postaci zawałcowań i nieciągłości materiału. Celem pracy jest dobór nastaw technologicznych (procesowych), które wymuszają taki schemat płynięcia metalu podczas wytwarzania rur metodą pielgrzymową, który po dowałcowaniu kielicha zapewni zwiększenie długości rury przy spełnieniu wymogów jakościowych. W trakcie realizacji badań numerycznych stwierdzono, że efekt ten jest uzależniony od procesu walcowania i dziurowania w walcierce skośnej wydłużającej.

Wstępne badania numeryczne wykazały, że poprzez zmianę nastaw walców walcarki skośnej wydłużającej możliwe jest sterowanie płynięciem metalu i w konsekwencji zmiana kształtu końcówki tulei. Na rysunku 64 przedstawiono przekrój końcówki tulei grubościennnej uzyskany po symulacji walcowania w skośnej walcierce wydłużającej przy nastawach procesowych stosowanych w zakładzie przemysłowym dla rury o średnicy wewnętrznej $\varnothing = 177$ mm i grubości ścianki $g = 28$ mm wytwarzanej z wlewka kwadratowego o boku 280×280 mm² i długości $L = 1650$ mm.

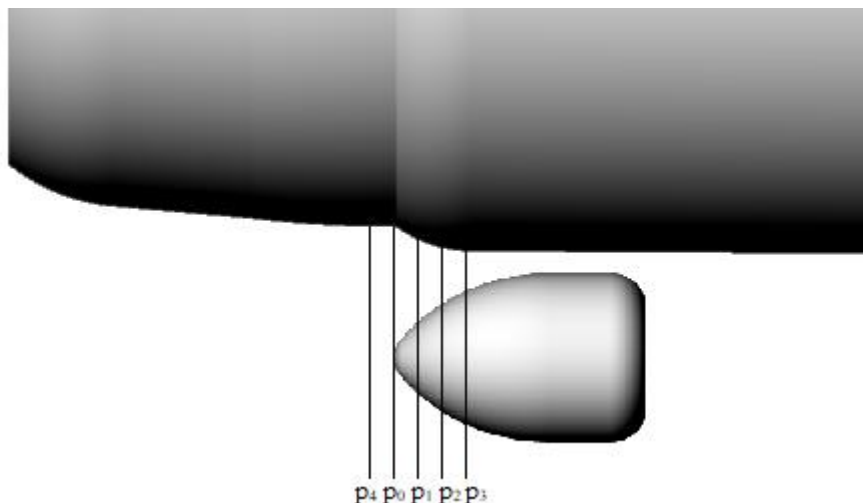


Rysunek 64. Kształt przekroju końcówki tulei grubościenniej po symulacji walcowania w skośnej walcierce wydłużającej przy standardowych nastawach procesowych

Na rysunku 59 widoczny jest ubytek materiału wewnątrz tulei spowodowany kształtowaniem i wyrwaniem denka. Ma charakterystyczny kształt położony na obwodzie w kształcie pierścienia. Końcówka tulei nie stanowi jednej płaszczyzny i widoczne są wydłużenia warstwy powierzchniowej i wewnętrznej. Kształt końcówki tulei walcowanej w warunkach przemysłowych jest zbliżony do przedstawionego na rysunku 64. Zaobserwowano również, że kształt końcówki tulei jest zmienny i uzależniony od warunków odkształcenia.

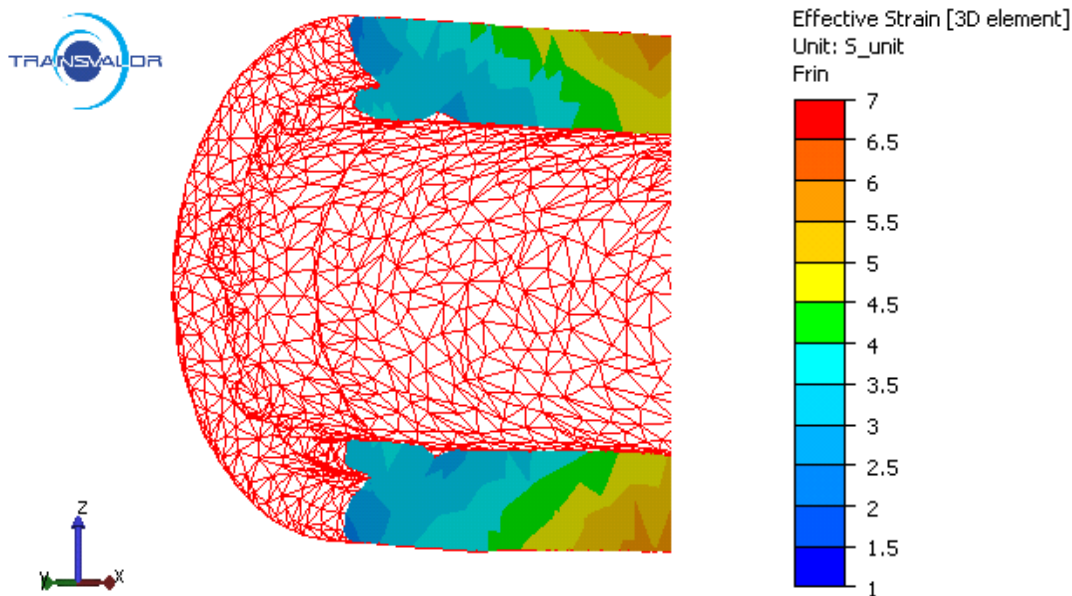
W celu określenia wpływu nastaw technologicznych na kształt końcówki tulei po walcowaniu w skośnej walcierce wydłużającej przeprowadzono kompleksowe symulacje komputerowe dla różnych nastaw osprzętu podczas procesu, które zdaniem autora wpłyną na kształt końcówki tulei i umożliwią wykorzystanie zalet bezkielichowego walcowania pielgrzymowego. W pierwszej kolejności skoncentrowano się na położeniu główki dziurującej względem progu walców skośnej walcarki wydłużającej, następnie badano wpływ kątów rozwałcowania i zukosowania na sposób płynięcia metalu i kształt końcówki rury. W instrukcji technologicznej

dostarczonej przez producenta brak jest informacji o wpływie położenia główki dziurującej na geometrię wyrobu, zatem zgodnie z literaturą [36] ustawiono jej początek równo z progiem walca (położenie p_0). W trakcie badań numerycznych zmieniano jej położenie w osi walcowania względem punktu p_0 o odległości $p_1 = 10$ mm, $p_2 = 20$ mm, $p_3 = 30$ mm zgodnie z kierunkiem płynięcia materiału oraz o $p_4 = 10$ mm w kierunku przeciwnym do kierunku płynięcia materiału. Schematycznie zmiany położenia główki dziurującej przedstawiono na rysunku 65.

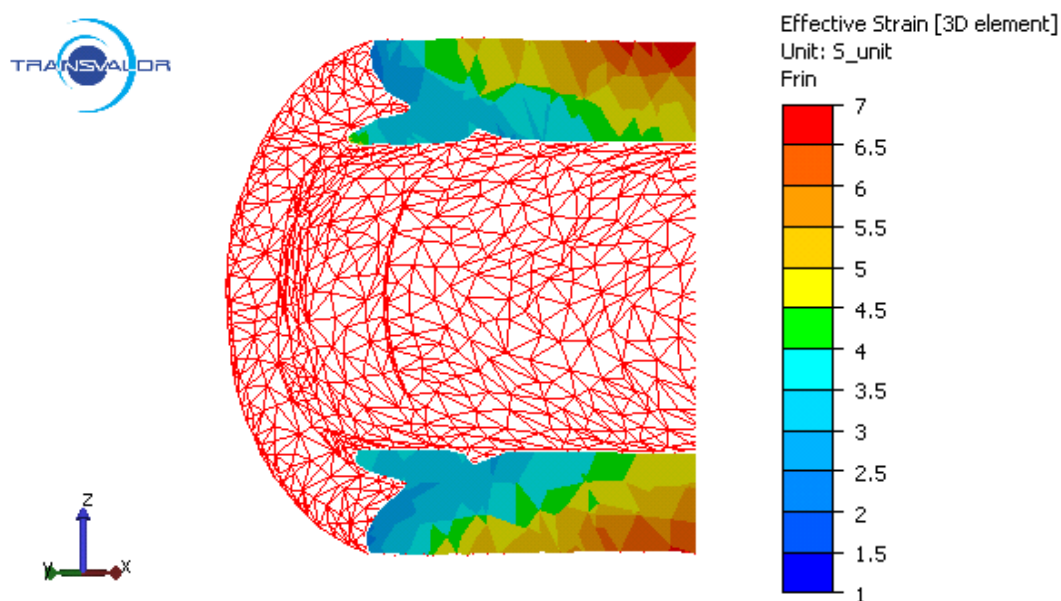


Rysunek 65. Rozmieszczenie położenia główki dziurującej w wariantach przeprowadzonych symulacji komputerowych

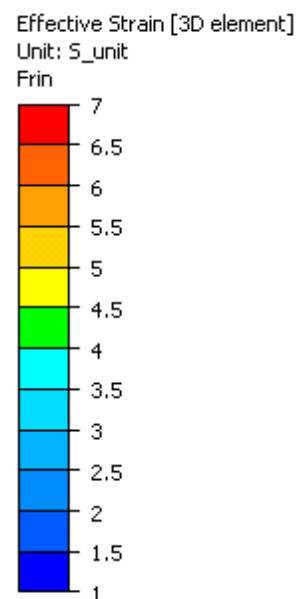
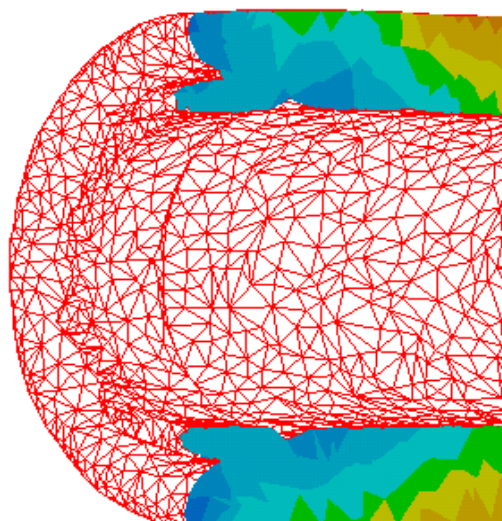
Na rysunkach 66 ÷ 70 zostały przedstawione rozkłady intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po symulacji walcowania w skośnej walcarce wydłużającej uwzględniające zmiany położenia główki dziurującej względem progu walca zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 65.



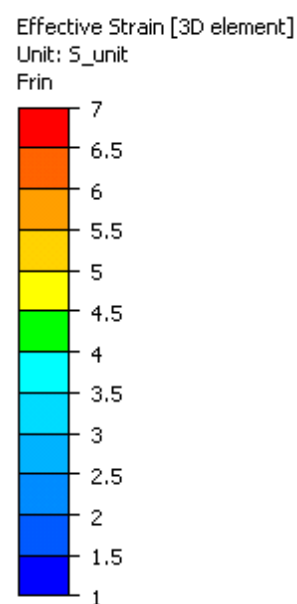
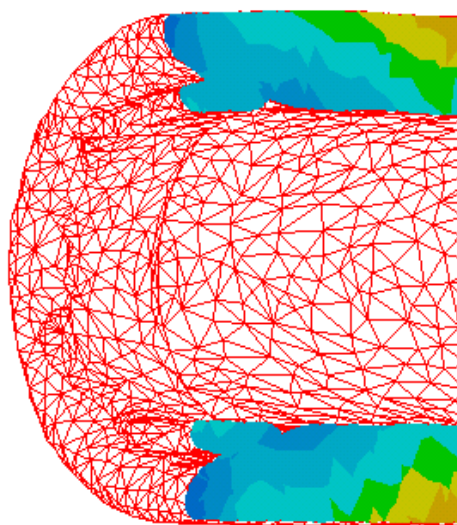
Rysunek 66. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_0 головки dziurującej względem progu walca



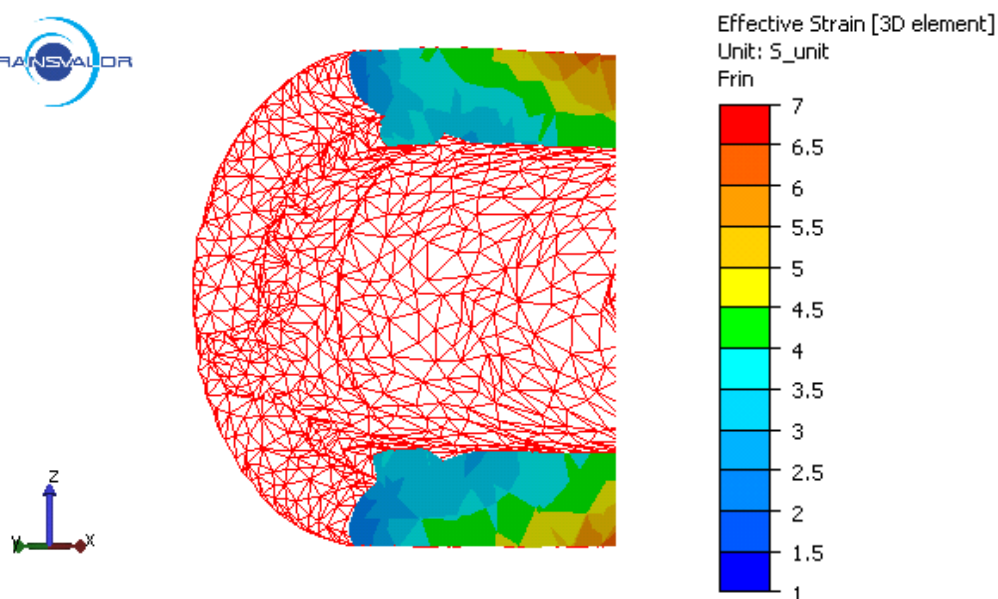
Rysunek 67. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_1 головки dziurującej względem progu walca



Rysunek 68. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_2 główki dziurującej względem progu walca



Rysunek 69. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_3 główki dziurującej względem progu walca

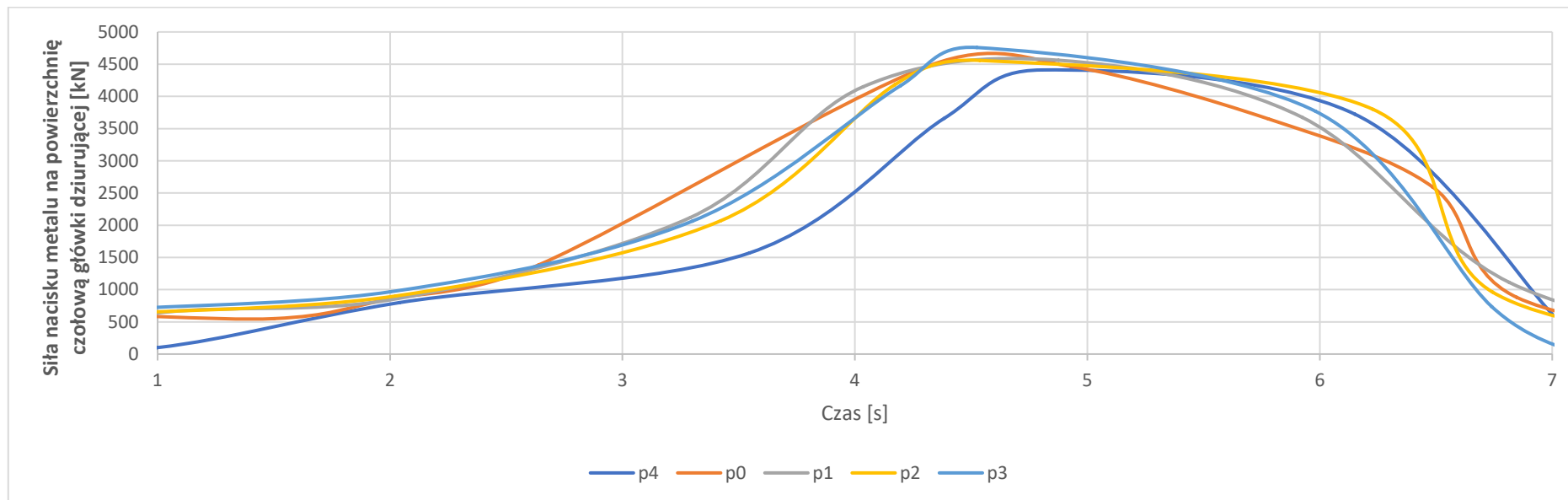


Rysunek 70. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_4 główki dziurującej względem progu walca

Na podstawie analizy danych zamieszczonych na rysunkach 66 ÷ 70 można stwierdzić, że zmiana położenia główki względem progu walca wpłynęła na rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki oraz na zmianę kształtu końcówki tulei. Wraz z przesuwaniem główki dziurującej w kierunku przeciwnym do kierunku walcowania (rys. 66 ÷ 69) zmieniał się sposób płynięcia metalu w wewnętrznej części tulei grubościenniej. Najkorzystniejszy kształt tulei według autora uzyskano w położeniu p_4 (rys. 70 Rysunek 70), ponieważ charakteryzował się zbliżonym wydłużeniem warstw wierzchniej i środkowej. Zmiana sposobu płynięcia metalu wywołana przemieszczeniem główki dziurującej względem progu walca wpłynęła również na siłę nacisku metalu na powierzchnię główki dziurującej. Przesunięcie główki w położenie p_4 skutkowało obniżoną siłą nacisku metalu na jej powierzchnię.

Z danych zamieszczonych na rysunku 71 wynika, że dla każdego z ustawień główki charakter krzywej opisującej zmiany siły nacisku na główkę dziurującą w funkcji czasu walcowania jest zbliżony. Zaobserwowano przesunięcie wykresu w czasie ze względu na zwiększenie intensywności odkształcenia. Dla położenia główki dziurującej w wariancie p_4 maksymalna zarejestrowana siła nacisku wynosi 4410 kN, natomiast dla pozostałych analizowanych przypadków około 4760 kN. Na podstawie analizy danych zamieszczonych na rysunku 71 można stwierdzić, że rozwiązanie takie oprócz

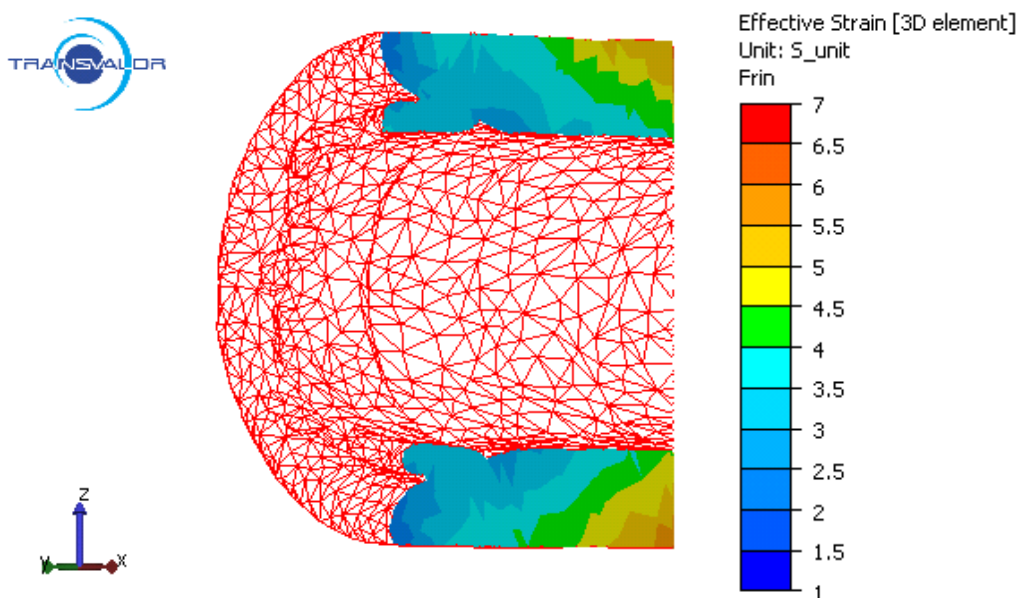
korzystnego wpływu na kształt końcówki ukształtowanej tulei grubościennej bez dna, powoduje również zmniejszenie nacisku metalu na główkę dziurującą obniżając zużycie energii niezbędnej do odwalcowania tulei oraz wydłuża czas jej kampanii.



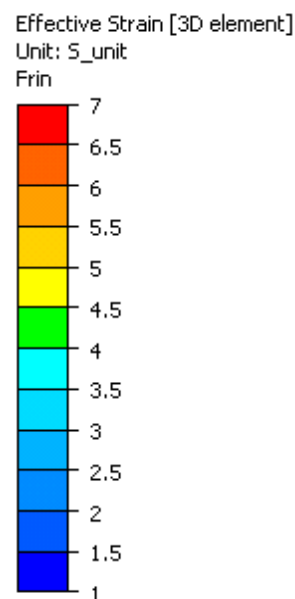
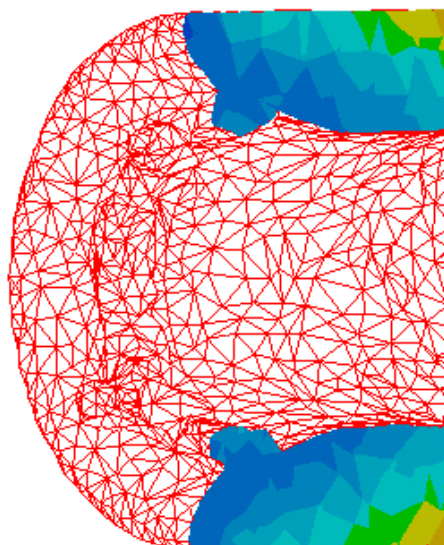
Rysunek 71. Wykres zależności siły nacisku metalu na powierzchnię głowki dziurującej od czasu przebiegu procesu walcowania tulei grubościennych w skośnej walcarce wydłużającej

Kolejnym etapem badań była analiza wpływu kątów rozwalcowania α i zukosowania β na kształt końcówki tulei. Dla analizowanej technologii walcowania rur bezszwowym metodą pielgrzymową wartości tych kątów opisane zostały w rozdziale 5.3.3.

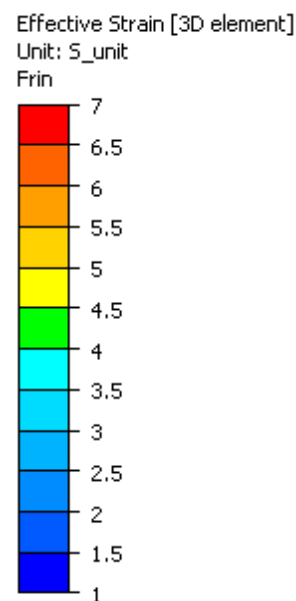
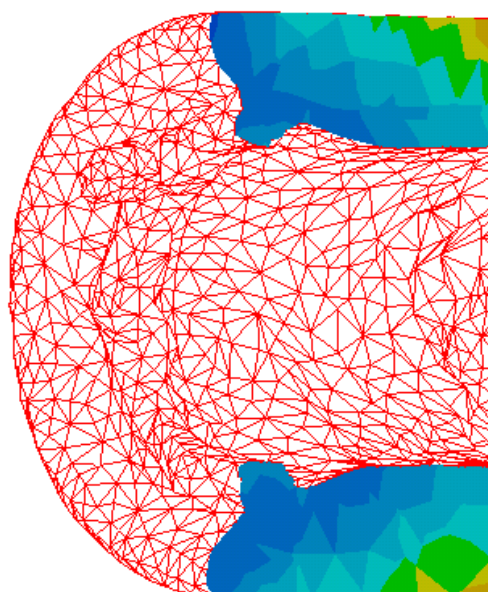
Kąt rozwalcowania α jest odpowiedzialny za intensywność redukcji ścianki tulei oraz wpływa na warunek chwytu materiału. W praktyce jest on wynikiem innych nastaw technologicznych i brak jest praktycznych informacji na temat jego wpływu na kształtowanie końcówki tulei. Zatem na podstawie literatury [36, 118], przyjęto, że kąt rozwalcowania α powinien mieścić się w zakresie $\alpha = 3^\circ \div 4^\circ$ i jeśli jest zbyt mały powoduje wydłużenie strefy odkształcenia, co niekorzystnie wpływa na stan naprężeń w osi tulei. Może to powodować wewnętrzne pękanie materiału daleko przed główką i niekorzystnie wpływać ja jakoś powierzchni wewnętrznej. Do przeprowadzenia symulacji komputerowych walcowania rur w skośnej walcarce wydłużającej przyjęto następujące kąty rozwalcowania $\alpha_1 = 3,0^\circ$, $\alpha_2 = 3,25^\circ$, $\alpha_3 = 3,50^\circ$, $\alpha_4 = 3,75^\circ$, $\alpha_5 = 4,0^\circ$. Symulacje przeprowadzono dla ustalonego we wcześniejszym etapie położenia (p_4) główki dziurującej względem progu walca oraz stałej wartości kąta zukosowania $\beta = 5^\circ$. Rozkłady intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei uzyskane w badaniach numerycznych zostały przedstawione na rysunkach 72 ÷ 74.



Rysunek 72. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwalcowania $\alpha_1 = 3^\circ$



Rysunek 73. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwałcowania $\alpha_2 = 3,25^\circ$



Rysunek 74. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwałcowania $\alpha_5 = 4^\circ$

Z przedstawionych rozkładów intensywności odkształceń wynika, że wraz ze wzrostem kąta rozwałcowania α zmniejsza się średnia wartość intensywności odkształcenia. Efektem tego są różnice w płynięciu warstw powierzchniowych i wewnętrznych. Dla wartości $\alpha_1 = 3^\circ$ (rys. 72) zaobserwowano mniejsze wydłużenia warstw skrajnych tulei, natomiast dla $\alpha_5 = 4^\circ$ (rys. 74) zwiększone płynięcie metalu

nastąpiło w warstwie powierzchniowej ścianki. Analizując sposób płynięcia metalu i kształt końcówki tulei po wyrwaniu denka najkorzystniejsze warunki płynięcia metalu uzyskano dla kąta rozwałcowania $\alpha_2 = 3,25^\circ$ (rys. 73). Kształt tak odwałcowanej końcówki tulei charakteryzuje się najmniejszą różnicą w wydłużeniach warstw powierzchniowej i wewnętrznej, co korzystnie wpływa na kształtowanie rury w procesie dowalcowywania kielicha metodą pielgrzymową. Na rysunku 75 przedstawiono przekrój ścianek rury ukształtowanych dla skrajnych kątów rozwałcowania α . Zwiększenie intensywności odkształcenia przy kącie $\alpha_1 = 3^\circ$ (rys. 75a) spowodowało wydłużenie warstw skrajnych przy zmniejszeniu głębokości tzw. pierścienia. Powierzchnia wydłużonych warstw przy temperaturze walcowania około 1180° pokryta jest tlenkami (zgorzeliną). Dowalcowanie kielicha w takiej tulei może powodować nieciągłości na jego długości i konieczność usunięcia całej dowalcowanej części. Natomiast zastosowanie kąta $\alpha_5 = 4^\circ$ (rys. 75b) pogłębiło i wydłużyło zagłębienie po wyrwaniu denka oraz wpłynęło na zwiększenie długości warstwy zewnętrznej ścianki w stosunku do wewnętrznej, co w końcowym etapie walcowania pielgrzymowego może powodować zawalcowania na końcowej części rury.

a)



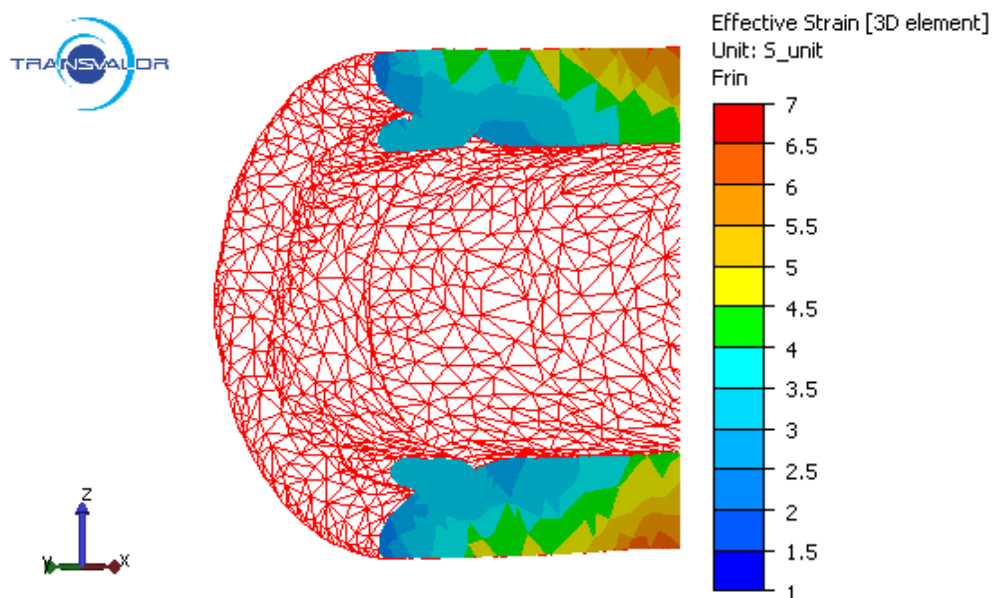
b)



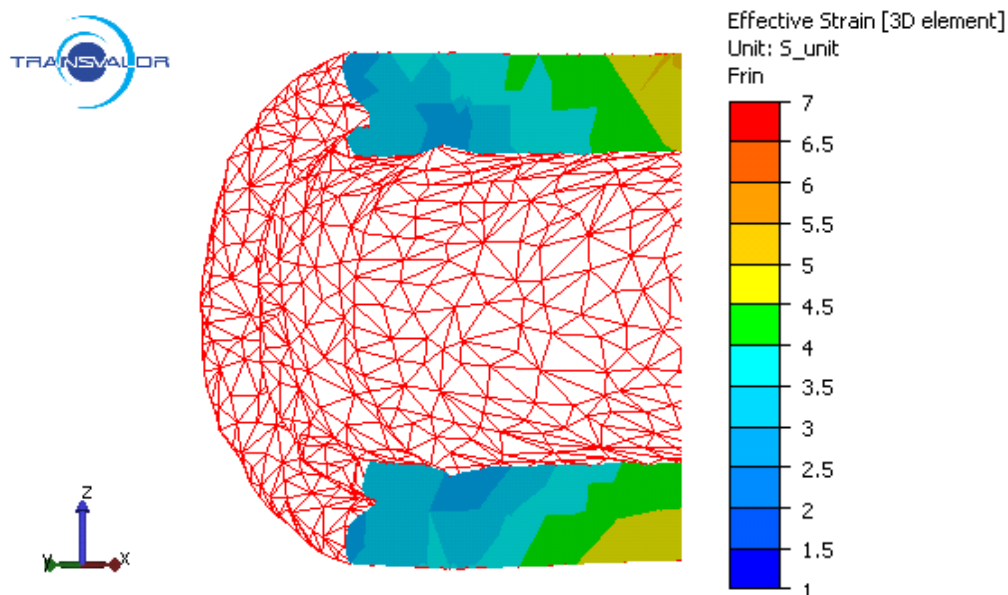
Rysunek 75. Różnica w długości warstwy wewnętrznej tulei grubościennnej dla skrajnych kątów rozwałcowania α : a) $\alpha_1 = 3^\circ$, b) $\alpha_5 = 4^\circ$

Kąt zukosowania β odpowiedzialny jest za poziomy ruch spiralny rury podczas walcowania. Na podstawie danych literaturowych [36, 118], przyjęto, że kąt zukosowania powinien mieć wartość z zakresu $\beta = 3^\circ \div 6^\circ$. Przeprowadzono symulacje komputerowe walcowania tulei grubościennych w skośnej walcarce wydłużającej dla położenia p_4 główki dziurującej, kąta rozwałcowania $\alpha = 3,25^\circ$ i trzech wariantów kąta

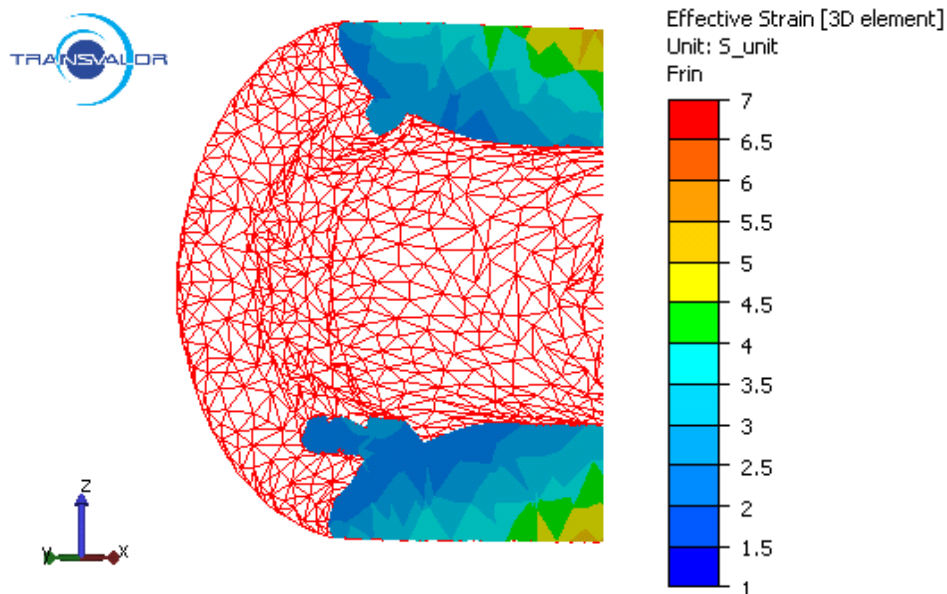
zukosowania $\beta_1 = 3^\circ$, $\beta_2 = 4,5^\circ$, $\beta_3 = 6^\circ$. Wyniki symulacji komputerowych wykazujących wpływ kąta zukosowania na kształt tulei grubościennnej po procesie walcowania w skośnej walcarce wydłużającej zostały zaprezentowane na rysunkach 76 ÷ 78 w formie rozkładów intensywności odkształcenia plastycznego.



Rysunek 76. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_1 = 3^\circ$



Rysunek 77. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_2 = 4,5^\circ$



Rysunek 78. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościenniej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_3 = 6^\circ$

Analiza wyników przeprowadzonych symulacji dla zmiennych wartości kąta β wykazała przesunięcie powstającego podczas wrywania denka pierścionka w kierunku końca tulei. Ponadto dla najniższych wartości kąta $\beta_1 = 3^\circ$ (rys. 76) oprócz przesunięcia zaobserwowano zwiększenie jego szerokości przy zmniejszeniu głębokości. Jednocześnie wpłynęło to na zwiększenie wydłużenia warstw wewnętrznych w stosunku do warstw powierzchniowych tulei. Natomiast dla największej badanej wartości kąta $\beta_3 = 6^\circ$ (rys. 78) zaobserwowano, że powstający pierścień jest głęboki i przesunięty w stronę środka tulei. Środkowa wartość kąta $\beta_2 = 4,5^\circ$ (rys. 77) powodowała przesunięcie pierścienia w kierunku końca tulei a wydłużenia warstwy wewnętrznej nie były tak duże jak dla kąta $\beta_3 = 6^\circ$.

W celu weryfikacji wyników badań symulacji numerycznych przeprowadzono próby przemysłowe walcowania pojedynczych tulei w skośnej walcarce wydłużającej dla zaproponowanych nastaw procesowych z następnym ich walcowaniem w walcarce pielgrzymowej według aktualnie stosowanej technologii. W efekcie otrzymano kielichy o różnych kształtach.

Przy nastawach osprzętu walcowniczego: położenie p_0 główki dziurującej, kąt rozwałcowania $\alpha = 3^\circ$ i kąt zukosowania $\beta = 6^\circ$ otrzymano kielich, którego fragment przedstawiono na rysunku 79. Z kształtu przekroju kielicha można wywnioskować, że

zastosowane parametry wymusiły płynięcie materiału przy trzpieniu powodując znaczne wydłużenie warstwy wewnętrznej przy dowlcowaniu kielicha.



Rysunek 79. Fragment przekroju kielicha powstających po walcowaniu pielgrzymowym przy położeniu p_0 główki dziurującej alongatora, kątach rozwalcowania $\alpha = 3^\circ$ i zukosowania $\beta = 6^\circ$

Natomiast przy nastawach: położenie p_4 główki dziurującej, kąt rozwalcowania $\alpha = 4^\circ$ i kąt zukosowania $\beta = 3^\circ$ otrzymano kielich, którego fragment przedstawiono na rysunku 80, na którym widać zawalcowanie pozostałości po wyrwaniu denka oraz pozostałości pierścionka przesuniętego na zakończenie wewnętrznej części tulei, co także potwierdziło wpływ parametrów walcowania w alongatorze na kształt końcówki rury.



Rysunek 80. Fragment przekroju kielicha powstających po walcowaniu pielgrzymowym przy położeniu p_4 główki dziurującej alongatora, kątach rozwalcowania $\alpha = 4^\circ$ i zukosowania $\beta = 3^\circ$

Część kielicha powstająca po walcowaniu pielgrzymowym, na którym widać zwiększone płynięcie metalu przy trzpieniu oraz warstwy powierzchniowej w wyniku czego występuje niekorzystne zawalcowanie pomiędzy pozostałością po wyrwaniu kielicha i warstwy wierzchniej. Natomiast korzystnym zjawiskiem jest przesunięcie pierścionka w kierunku końca rury. Dane uzyskanie w wyniku analizy symulacji

komputerowych są potwierdzeniem występowania zjawiska w rzeczywistym procesie produkcji rur bezszwowych metodą pielgrzymową.

Na podstawie doświadczeń własnych oraz analizy wyników przeprowadzonych badań numerycznych procesu walcowania tulei w walcierce skośnej wydłużającej ustalono, że najistotniejszymi czynnikami umożliwiającymi pełne wykorzystanie możliwości walcowania bezkielichowego są nastawy walców alongatora, które mają znaczący wpływ na kształt końcówki tulei po wyrwaniu denka. Zaproponowano kształt końca tulei, który wyeliminuje możliwość powstawania zawalcowań w trakcie dowalcowywania kielicha. Przekrój powinien być jak najbardziej równomiernie wydłużony tak, aby warstwy skrajne były cofnięte w stosunku do kierunku walcowania, a różnice w ich długościach w stosunku do długości części środkowej były jak najmniejsze. Należy również dążyć do całkowitego usunięcia powstającego po wyrwaniu denka pierścienia. W przypadku braku możliwości zniwelowania miejscowego zagłębienia (pierścienia) należy doprowadzić do jego maksymalnego przesunięcia w kierunku końca tulei. Hipotetyczny przekrój ścianki tulei, która powinna umożliwić osiągnięcie postawionego w pracy celu przedstawiono na rysunku 81.



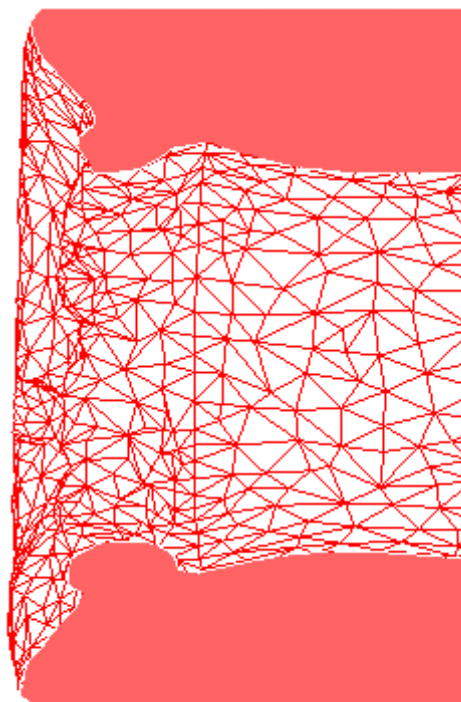
Rysunek 81. Hipotetyczny przekrój ścianki tulei

Niestety współzależność parametrów technologicznych i ich wpływ na istotny czynnik, jakim w przypadku bezkielichowego walcowania pielgrzymowego jest kształt końcówki tulei nie zostały wcześniej zbadane. W literaturze brak jest jednoznacznych wyników wskazujących na wpływ danego parametru w stosunku do pozostałych. Zdaniem autora należy podejść do zagadnienia w sposób całościowy i poszukiwać takiego kompleksu nastaw technologicznych, który umożliwi zrealizowanie postawionego celu, którym jest uzyskanie kształtu końcówki tulei po wyrwaniu denka o najmniejszej różnicy w wydłużeniu części powierzchniowej i wewnętrznej spowodowany jest najbardziej równomiernym sposobem płynięcia metalu. Wymaga to przeprowadzenia bardzo szerokiego zakresu badań, a każdy z etapów może stanowić osobne zagadnienie badawcze. W związku z tym zawężono pole poszukiwań do

określenia zestawu nastaw procesowych umożliwiających uzyskanie kształtu końcówki tulei grubościennej o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 215$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 357$ mm po wyrwaniu denka, który po procesie bezkielichowego walcowania pielgrzymowego umożliwi otrzymanie rury o średnicy $\varnothing = 177$ mm i grubości ścianki $g = 28$ mm o zwiększonym uzysku i tym samym zmniejszonym odpadzie technologicznym.

Wyniki przeprowadzonych wcześniej symulacji komputerowych walcowania tulei w alongatorze umożliwiły określenie kątów rozwałcowania $\alpha = 3,25^\circ$ i zukosowania $\beta = 4,5^\circ$ oraz położenia p_4 główki dziurującej jako pojedynczych parametrów technologicznych, z których każdy wpływa korzystnie na kształt tulei po walcowaniu w walcarce skośnej. Przeprowadzono symulacje komputerowe całego procesu bezkielichowego walcowania pielgrzymowego rury ze stali S235. Pierwszym etapem było wyciskanie tulei z dnem o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 215$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 357$ mm z wlewka o przekroju 280×280 mm² i długości około 1650 mm ze stali na prasie poziomej, następnie walcowanie w skośnej walcarce wydłużającej przy zastosowaniu wyznaczonego kompleksu nastaw technologicznych zapewniającego, zdaniem autora kształt końca tulei umożliwiający dowalcowanie kielicha wolnego od wad.

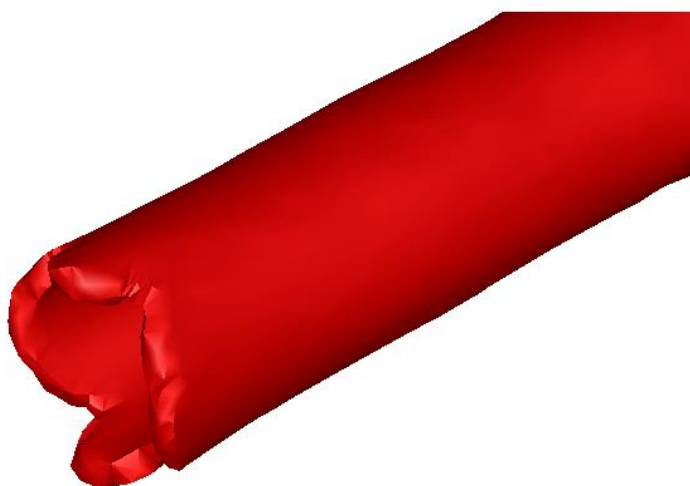
Wynikiem symulacji jest tuleja o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 215$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 357$ mm, której przekrój przedstawiono na rysunku 82. Kształt charakteryzuje się niewielką różnicą w długości warstw wewnętrznej w stosunku do powierzchniowej oraz zagłębieniem powstałym na obwodzie po wyrwaniu denka – pierścieniem, który jest płytszy i przesunięty w kierunku końcówki rury.



Rysunek 82. Kształt ścianki tulei po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej

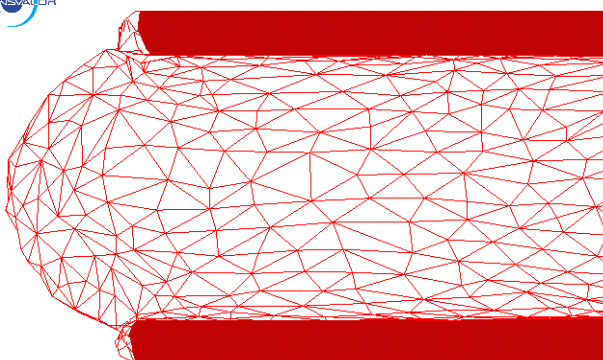
Zmiany nastaw alongatora zaproponowane przez autora potwierdziły korzystny wpływ na płynięcie metalu i ostateczny kształt końcówki tulei grubościennej otrzymanej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej. Nie udało się wyeliminować pozostałości po wyrwaniu denka (pierścieni), ale poprzez wymuszenie równomiernego płynięcia metalu w warstwie wewnętrznej i zewnętrznej doprowadzono do zminimalizowania jego głębokości i rozciągnięto go po długości tulei. Taki kształt powinien umożliwić jego wygładzenie podczas walcowania pielgrzymowego.

Przeprowadzono symulacje komputerowe walcowania pielgrzymowego otrzymanej tulei zachowując ustalone wcześniej parametry technologiczne. Uzyskano rurę o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 177$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 205$ mm, zaprezentowaną na rysunku 83. Wytworzona rura surowa charakteryzuje się brakiem kielicha dzięki czemu należy oczekiwać zwiększonej jej długości o około 1,7 m.



Rysunek 83. Rura surowa po walcowaniu pielgrzymowym metodą bezkielichową

Rysunek 84 przedstawia kształt ścianki rury po walcowaniu w walcarce pielgrzymowej metodą bezkielichową, na którym widać nierównomierną końcówkę (tzw. strzęp), który jest normalnym zjawiskiem wynikającym z obracania rury podczas ruchu jałowego. Warstwy odkształcane są zdecydowanie bardziej wydłużone i tworzą charakterystyczny kształt. Różnice w długości są większe niż w tradycyjnym (kielichowym) procesie, ponieważ dowałcowanie kielicha realizowane jest w zakresie $6 \div 8$ uderzeń.

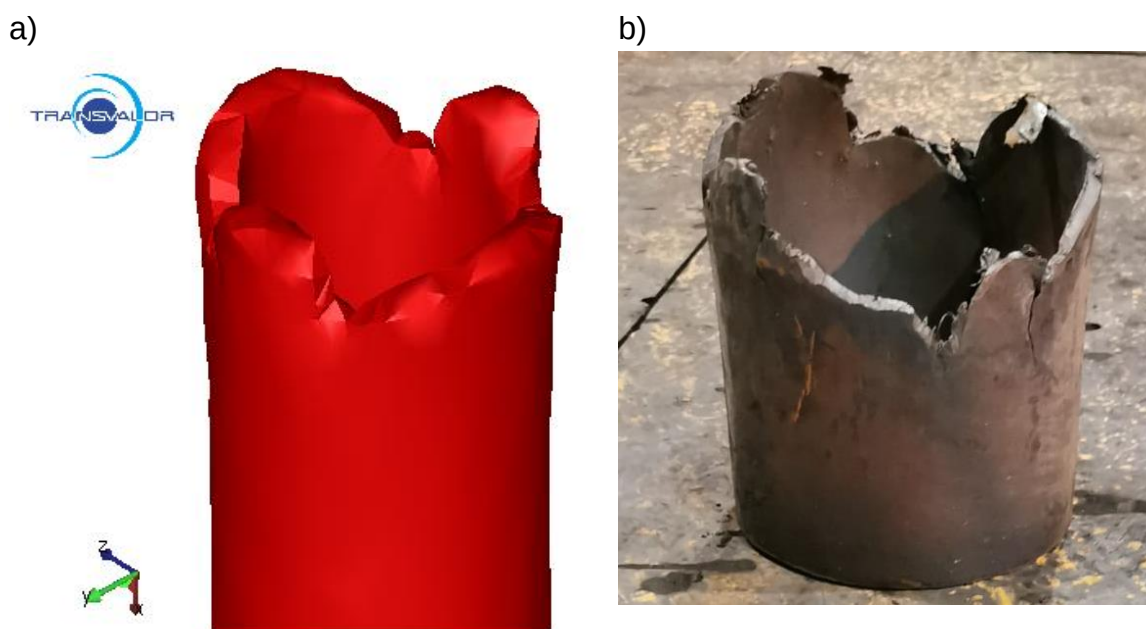


Rysunek 84. Kształt ścianki rury po walcowaniu w walcarce pielgrzymowej metodą bezkielichową.

Grubość ścianki rury otrzymanej w wyniku symulacji numerycznych bezkielichowego procesu wytwarzania metodą pielgrzymową jest równomierna i brak widocznych nieciągłości materiału. Potwierdziło to, że poprzez zmiany nastaw

osprzętu walcowniczego na etapie walcowania w skośnej walcarce wydłużającej możliwe jest wymuszenie odpowiedniego stanu naprężeń i odkształceń, który powoduje taki sposób płynięcia metalu, który zapewnia uzyskanie wyrobu wolnego od wad wewnętrznych.

W celu potwierdzenia słuszności wyników symulacji komputerowych procesu bezkielichowego wytwarzania rur metodą pielgrzymową, w zakładzie produkcyjnym przeprowadzono weryfikacyjne badania przemysłowe z uwzględnieniem opracowanych w pracy parametrów technologicznych walcowania w skośnej walcarce wydłużającej. Rysunek 85 przedstawia fragment dowlacowanej części kielicha uzyskanego w wyniku symulacji numerycznych oraz w rzeczywistym procesie produkcyjnym.



Rysunek 85. Fragment dowlacowanej części kielicha uzyskanej w:
a) wyniku symulacji numerycznych, b) rzeczywistym procesie produkcyjnym

Wytworzona rura charakteryzuje się większym uzyskiem i jest dłuższa od wytwarzanej według obecnie stosowanej technologii o około 1,7 m. Kształt końcówki rury surowej uzyskanej w wyniku symulacji komputerowych jest zbliżony do końcówki rury wytworzonej w rzeczywistym procesie. Weryfikacja przemysłowa przedstawionej w pracy koncepcji procesu bezkielichowego wytwarzania rur metodą pielgrzymową dowiodła słuszność postawionej tezy.

Przeprowadzone badania dowiodły, że korzystając z narzędzi numerycznych do modelowania procesów przeróbki plastycznej możliwe jest opracowanie parametrów technologicznych procesu bezkielichowego wytwarzania rur metodą pielgrzymową, które umożliwią uzyskanie rury surowej wolnej od wad wewnętrznych.

Efektem przeprowadzonej analizy badań jest opracowanie parametrów walcowania w walcarce wydłużającej umożliwiającej zastosowanie technologii bezkielichowego pielgrzymowego walcowania rur, która umożliwi uzyskanie produktów w postaci rur o podwyższonych parametrach geometrycznych i użytkowych oraz o zwiększonej długości, niedostępnej obecnie dla produktów na rynku. Wdrożenie opracowanej bezkielichowej metody wytwarzania rur dodatkowo obniży ślad węglowy poprzez obniżenie zużycia energii niezbędnej do wyprodukowania rury metodą bezkielichową w stosunku do tradycyjnej technologii i zmniejszenie odpadu technologicznego.

6. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy przeprowadzono analizę teoretyczną - doświadczalną wytwarzania rur w procesie walcowania metodą pielgrzymową. Przeprowadzono kompleksowe symulacje numeryczne każdego z etapów procesu:

- wyciskania tulei grubościennych na prasie poziomej;
- walcowania tulei w walcierce skośnej wydłużającej;
- walcowania rur w walcierce pielgrzymowej.

Uzyskane wyniki umożliwiły analizę sposobu płynięcia materiału podczas wytwarzania rur metodą pielgrzymową i poszerzenie wiedzy z zakresu wpływu parametrów przeróbki plastycznej metalu na kształtowanie końcówki rury, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu nastaw technologicznych alongatora na kształt i geometrię końcówki rury. Analizowano wpływ kąta rozwałcowania α i zukosowania β oraz położenie główki dziurującej i ich wpływ na sposób płynięcia materiału i kształtowanie końcówki tulei. Dla wybranych wymiarów rur i parametrów procesowych przeprowadzono przemysłowe próby technologiczne, które wykazały zgodność geometrii kielichów ukształtowanych podczas prób z kielichami będącymi wynikami symulacji numerycznej.

Kolejnym etapem badań było określenie najkorzystniejszego kształtu końcówki tulei ukształtowanej w alongatorze i przeprowadzenie kompleksowych symulacji komputerowych dla parametrów procesowych określonych na podstawie badań numerycznych. Przeprowadzono przemysłowe próby technologiczne walcowania, które pozwoliły na weryfikację parametrów zastosowanych w badaniach numerycznych oraz potwierdziły możliwość sterowania kształtem kielicha poprzez zastosowanie różnych nastaw technologicznych. Na podstawie analizy profilu produkcyjnego zakładu dokonano wyboru rury o średnicy wewnętrznej $\varnothing_1 = 177$ mm i zewnętrznej $\varnothing_2 = 205$ mm. Przeprowadzono symulacje komputerowe wytwarzania rury w walcowni pielgrzymowej dla wytypowanych wcześniej parametrów technologicznych w technologii bezkielichowej. Wyniki badań numerycznych potwierdziły słuszność założonych parametrów procesowych, ponieważ wymusiły taki sposób płynięcia metalu i ukształtowanie końcówki tulei po walcowaniu w walcierce skośnej dziurującej, który umożliwił dowalcowanie kielicha wolnego od wad. Kolejnym etapem badań było walcowanie w warunkach przemysłowych rury w bezkielichowym procesie walcowania pielgrzymowego. Wytworzona rura charakteryzowała się

brakiem zawałców i dzięki dowałcowanemu kielichowi była dłuższa od wytwarzanej według obecnie stosowanej technologii o ok. 1,7m.

Na podstawie otrzymanych wyników badań teoretycznych i doświadczalnych sformułowano następujące stwierdzenia i wnioski:

1. Udowodniono postawioną tezę naukową postawioną w pracy wykazując, że poprzez zastosowanie narzędzi numerycznych do modelowania procesów przeróbki plastycznej możliwe jest opracowanie parametrów technologicznych wytwarzania rur stalowych metodą bezkielichowego walcowania w walcierce pielgrzymowej, które zapewni uzyskanie wyrobu wolnego od wad wewnętrznych.
2. Na kształt końcówki rury i wady w dowałcowanym kielichu wpływa sposób płynięcia materiału na etapie wytwarzania w walcierce skośnej wydłużającej.
3. Stwierdzono, że wzrost wartości kąta rozwałcowania α powoduje zmniejszenie średniej wartości intensywności odkształcenia. Efektem tego są różnice w płynięciu metalu warstw powierzchniowych i wewnętrznych końcówki tulei.
4. Zmiana kąta zukośowania wymusza sposób płynięcia warstw wewnętrznych tulei, który zmienia głębokość i długość pierścienia wewnątrz tulei, natomiast położenie główki dziurującej wpływa na jego przesunięcie w osi walcowania.
5. Określono kształt końcówki tulei, który po dowałcowaniu kielicha zminimalizuje powstawanie wad wewnętrznych w dowałcowanej części rury.
6. Stosowanie wytycznych procesu bezkielichowego wytwarzania rur bez szwu metodą pielgrzymową, umożliwi uzyskanie wyrobu charakteryzującego się większym uzyskiem oraz zmniejszonym odpadzie technologicznym dzięki dowałcowanemu kielichowi przy spełnieniu wymogów jakościowych.

7. Spis rysunków

Rysunek 1. Przykład rury ze szwem	5
Rysunek 2. Schemat procesu walcowania tulei rurowej w walcarce skośnej dwuwalcowej Mannesmanna	8
Rysunek 3. Zmieniony kształt walców Mannesmanna	9
Rysunek 4. Schemat procesu walcowania tulei rurowej w walcarce skośnej dwuwalcowej Stiefela	10
Rysunek 5. Schemat walcarki skośnej z prowadnicami tarczowymi Dieschera	11
Rysunek 6. Walcarka skośna trójwalcowa Assela].....	12
Rysunek 7. Modele geometryczne walcarki skośnej dziurującej	13
Rysunek 8. Schemat przebijania w prasie grubościennych tulei z dnem	15
Rysunek 9. Przebijak prasy dziurującej wraz z zamontowaną główką przebijaka	16
Rysunek 10. Przykładowe kształty główek przebijaka.....	16
Rysunek 11. Schemat wyciskania współbieżnego rur	17
Rysunek 12. Przykład precyzyjnej rury bez szwu wytworzona metodą wyciskania...	18
Rysunek 13. Przykładowy schemat ustawienia walcarki skośnej wydłużającej	19
Rysunek 14. Profil walca.....	20
Rysunek 15. Końcowy etap walcowania w walcarce wydłużającej	21
Rysunek 16. Widok walcarki skośnej wydłużającej w początkowym i końcowym etapie walcowania.....	21
Rysunek 17. Schemat ciągłego walcowania rur	22
Rysunek 18. Ciągnięcie swobodne	24
Rysunek 19. Ciągnięcie na trzpieniu stałym	25
Rysunek 20. Ciągnięcie na trzpieniu swobodnym.....	25
Rysunek 21. Ciągnięcie rur na trzpieniu długim	26
Rysunek 22. Schemat procesu przepychania tulei systemem Ehrhardta.....	27
Rysunek 23. Usytuowanie wykroju walców względem odkształcenia	28
Rysunek 24. Schemat podstawowych urządzeń walcowni przepychowej.....	29
Rysunek 25. Walcowanie w praktyce w Walcowni Rur Andrzej	30
Rysunek 26. Schemat walcowni z walcarką skośną typu Mannesmanna oraz walcarkami pielgrzymowymi.....	31
Rysunek 27. Usuwanie zgorzeliny w zbijaczu hydraulicznym	32
Rysunek 28. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową.....	33

Rysunek 29. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową	34
Rysunek 30. Schemat walcowania rury metodą pielgrzymową	34
Rysunek 31. Rura z odpadem technologicznym tzw. kielich	35
Rysunek 32. Przykłady kielichów jako odpad technologiczny	35
Rysunek 33. Rura w procesie walcowania na walcarce pielgrzymowej	36
Rysunek 34. Przykłady kielichów w przekroju	38
Rysunek 35. Schemat zakresu badań.....	41
Rysunek 36. Wlewki przygotowany do wprowadzenia do matrycy prasy.....	44
Rysunek 37. Przykład tulei grubościennnej w momencie wyciągania z prasy	45
Rysunek 38. Widok powierzchni tulei grubościennnej po procesie wyciskania	45
Rysunek 39. Walce alongatora w zakładzie przemysłowym	46
Rysunek 40. Przykład wyrwanego denka.....	47
Rysunek 41. Przykład tulei grubościennnej z wyrwanym denkiem.....	48
Rysunek 42. Przykładowy wałek pielgrzymowy w trakcie regeneracji.....	49
Rysunek 43. Magazyn trzpieni w zakładzie przemysłowym	50
Rysunek 44. Widok rury z kielichem bezpośrednio po zakończeniu wydłużania	52
Rysunek 45. Model przestrzenny wsadu do prasy przebijającej	57
Rysunek 46. Model przestrzenny matrycy prasy przebijającej	58
Rysunek 47. Model przestrzenny główki przebijaka prasy przebijającej	58
Rysunek 48. Model przestrzenny wypychacza prasy przebijającej	59
Rysunek 49. Model przestrzenny walca skośnej walcarki wydłużającej.....	60
Rysunek 50. Model przestrzenny główki dziurującej skośnej walcarki wydłużającej.	60
Rysunek 51. Model przestrzenny wypychacza skośnej walcarki wydłużającej	61
Rysunek 52. Model przestrzenny ławy w skośnej walcarce wydłużającej	61
Rysunek 53. Model przestrzenny walca pielgrzymowego	62
Rysunek 54. Model przestrzenny trzpienia walcarki pielgrzymowej	63
Rysunek 55. Schemat blokowy modułów programu Forge NX	64
Rysunek 56. Widok geometrii materiału i narzędzi użytych do analizy procesu wyciskania tulei grubościennnej na prasie przebijającej	68
Rysunek 57. Wykres zależności nacisku metalu na powierzchnię czołową stempla w czasie procesu wyciskania na prasie tulei grubościennnej z dnem.....	70
Rysunek 58. Złożenie składowych procesu walcowania w skośnej walcarce wydłużającej.....	72

Rysunek 59. Poszczególne fazy walcowania w walcarce skośnej	74
Rysunek 60. Tuleja grubościenna bez dna otrzymana po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej.....	76
Rysunek 61. Złożenie składowych procesu walcowania w walcarce pielgrzymowej.	77
Rysunek 62. Rura surowa z kielichem otrzymana w wyniku symulacji numerycznych metodą walcowania pielgrzymowego	78
Rysunek 63. Rzeczywisty fragment przekroju kielicha po walcowaniu pielgrzymowym oraz część przekroju rury uzyskanej w wyniku symulacji komputerowej.....	79
Rysunek 64. Kształt przekroju końcówki tulei grubościennej po symulacji walcowania w skośnej walcarce wydłużającej przy standardowych nastawach procesowych	82
Rysunek 65. Rozmieszczenie położenia główki dziurującej w wariantach przeprowadzonych symulacji komputerowych	83
Rysunek 66. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej p_0 walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_0 główki dziurującej względem progu walca.....	84
Rysunek 67. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_1 główki dziurującej względem progu walca	84
Rysunek 68. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_2 główki dziurującej względem progu walca	85
Rysunek 69. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_3 główki dziurującej względem progu walca	85
Rysunek 70. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy położeniu p_4 główki dziurującej względem progu walca	86
Rysunek 71. Wykres zależności siły nacisku metalu na powierzchnię główki dziurującej od czasu przebiegu procesu walcowania tulei grubościennej w skośnej walcarce wydłużającej.....	88
Rysunek 72. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwałcowania $\alpha_1 = 3^\circ$	89

Rysunek 73. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwałcowania $\alpha_2 = 3,25^\circ$	90
Rysunek 74. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta rozwałcowania $\alpha_5 = 4^\circ$	90
Rysunek 75. Różnica w długości warstwy wewnętrznej tulei grubościennnej dla skrajnych kątów rozwałcowania α	91
Rysunek 76. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_1 = 3^\circ$	92
Rysunek 77. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_2 = 4,5^\circ$	92
Rysunek 78. Rozkład intensywności odkształcenia plastycznego na grubości ścianki tulei grubościennnej po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej przy wartości kąta zukosowania $\beta_3 = 6^\circ$	93
Rysunek 79. Fragment przekroju kielicha powstających po walcowaniu pielgrzymowym przy położeniu p_0 główki dziurującej alongatora, kątach rozwałcowania $\alpha = 3^\circ$ i zukosowania $\beta = 6^\circ$	94
Rysunek 80. Fragment przekroju kielicha powstających po walcowaniu pielgrzymowym przy położeniu p_4 główki dziurującej alongatora, kątach rozwałcowania $\alpha = 4^\circ$ i zukosowania $\beta = 3^\circ$	94
Rysunek 81. Hipotetyczny przekrój ścianki tulei.....	95
Rysunek 82. Kształt ścianki tulei po walcowaniu w skośnej walcarce wydłużającej..	97
Rysunek 83. Rura surowa po walcowaniu pielgrzymowym metodą bezkielichową...	98
Rysunek 84. Kształt ścianki rury po walcowaniu w walcarce pielgrzymowej metodą bezkielichową.....	98
Rysunek 85. Fragment dowałcowanej części kielicha uzyskanej w wyniku symulacji numerycznych oraz rzeczywistym procesie produkcyjnym	99

8. Literatura

1. Avitzur B. *Metal Forming. Processes and Analysis*. Mc Graw-Hill Book Company, 1968.
2. Bade K. *Herstellung von Rohre*. Düsseldorf: Verlag Stahleissen M.B.H., 1975.
3. Bartnicki J. *Studium procesu przepychania obrotowego The Study of Rolling-Extrusion Process*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2014.
4. Bednarski T. *Mechanika plastycznego płynięcia metali*. Warszawa: Oficyna Wydawnictwo Poitechniki Warszawskiej, 1993.
5. Blau P. J. *Friction Science and Technology FROM CONCEPTS to APPLICATIONS*. by Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
6. Blazynski T. Z. *Metal Forming, Tool Profiles and Flow*. Londyn: Macmillan Press, 1976.
7. Ciszewski B., Czermiński J., Malkiewicz T., Adamski Cz. *Praca zbiorowa. Encyklopedia Techniki. Metalurgia k*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk, 1978.
8. Ding J., Zhang J., Li H., Wang G., Sun L. „Numerical simulation and deformation behavior of a Ti/steel clad plate during the rolling process.” *Metals* 2023 13(2):218.
9. Drujan W. M., Czekmariew A. P. *Tieorija trubnogo proizvodstva*. Moskwa: Mietełurgija, 1976.
10. Dyja H. S., Laber K. B., Mróz S. J. „Influence of the round bars normalizing rolling process on the energy and force parameters.” *Steel Research International, Special Edi-tion, Volume 1* 2008: 410 ÷ 416.
11. Dyja H., Banaszek G. „Wpływ głównych parametrów kucia i kształtu narzędzi na ujednorodnienie stopni przekucia i niwelacji wad pochodzenia metalurgicznego w odkuwkach ze stali 18G2A.” Częstochowa: Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Sesja Naukowa, 2000.
12. Dyja H., Krakowiak M., Rydz D. „The Influence of the Thickness of a Bimetallic Layer (18G2A + 0H18N10T) on the Distribution of the Relative Flow Rate in Asymmetrical Rolling.” *Journal of Materials Processing Technology Vol.138* 2003.
13. Dyja H., Lesik L., Mróz S., Głowacki M. „Wpływ metod obliczeniowych na poprawność analizy procesu walcowania w wykrojach.” *Walcownictwo* 20 ÷ 22 10 1999: 57 ÷ 62.

14. Dyja H., Mróz S. „Examination of energy and force parameters during rolling process using longitudinal slitting passes.” *Zapiski Gornego Instituta, tom 170, cz. II* 2007: 160 ÷ 163.
15. Dyja H., Mróz S. „Numeryczne modelowanie niestabilnego plastycznego płynięcia metalu podczas walcowania w wykroju skrzynkowym.” *Hutnik – Wiadomości Hutnicze, Nr 6* 2007: 288 ÷ 291.
16. Dyja H., Mróz S., Lesik L. „Inter-stand deformation of strip during the rolling process.” *The Chinese Society for Metals CSM 2001 Annual Meeting Proceedings* 2001: 350 ÷ 354.
17. Dyja H., Mróz S., Łabuda E., Lesik L. „Simulation and experimental investigation of rolling of the angle steel in the butterfly closed passes.” *The Ninth International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, January 3-9*. Red. Lopez-Pamies O. Khan A. Aruba: Proceedings of PLASTICITY, 2002. 415 ÷ 417.
18. Dyja H., Mróz S., Milenin A. „Simulation of metal forming during multipass rolling of shape bars.” *International Conference on Advanced in Materials and Processing Technologies (AMPT 2003) Vol. 1, 8-11 July*. Red. Hashmi M.S.J. Olabi A. G. Dublin: Dublin City University, 2003. 382 ÷ 385.
19. Dyja H., Mróz S., Milenin A. „Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars.” *Journal of Materials Processing Technology, 153-154* 2004: 108 ÷ 114.
20. Dyja H., Szota P., Mróz S. „Numeryczne modelowanie procesu walcowania prętów z wzdluznym rozdzielaniem pasma.” *Fizyczne i Matematyczne Modelowanie Procesów Obróbki Plastycznej FiMM'2003 Warszawa 20-21 maj, Prace Naukowe, Mechanika z. 207*. Warszawa 20-21 maj: Politechnika Warszawska, 2003. 65 ÷ 70.
21. Finkelsztein S. J. *Sprawocznik po prokatnomu proizvodstvu*. Moskwa: Mietełłurgija, 1975.
22. Fomiczew I. A. *Kosaja prokatka*. Moskwa: Mietełłurgizdat, 1963.
23. Fourment L., Coupeux T., Ducloux R., Wey E., Chenot J.L. *Forging and Related Technology*. Birmingham, 1998.
24. Galeji A. *Bildsame Formgebung der Metalle*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 1967.

25. Głowacki M. *Termomechaniczno-mikrostrukturalny model walcowania w wykrojach kształtowych*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 1998.
26. Główny Urząd Statystyczny. 10 04 2024.
www.stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5477/2/141/1/produkcja_wazniejszych_wyrobow_przemyslowych_w_grudniu_2023_roku.pdf.
27. Gontarz A. *Aspekty teoretyczne i badawcze prac zrealizowanych w KKMiTOP w 2008 r.* Lublin: Wyd. Politechniki Lubelskiej, 2009.
28. Gontarz A., Winiarski G. „Analiza teoretyczna procesu kształtowania uzębionego wału drążonego metodą wyciskania z ruchomą tuleją.” *Hutnik* 2015: 153 ÷ 157.
29. Gronostajski J. *Obróbka Plastyczna Metali*. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1973.
30. Grudiev A. P. *Teoria prokatki*. Moskwa, 1988.
31. Gurson A. L. „Continuum theory of ductile rapture by void nucleation and growth.” *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99(1) 1977: 2 ÷ 15.
32. Hoff N.J. „Approximate Analysis of Structures in the Presence of Moderately Large Steps Deformation.” *Quart., Appl. Mech.*, 2 1954: 49.
33. Ishikawa A. et al. „The New Manufacturing Processes for Medium Seamless Tube.” *Proc. 3rd Int. Conf. on Steel Rolling Technology of Pipe and Tube and their Application*. Eds. Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 1985. 71 ÷ 78.
34. Kajtoch J., Kazanecki J. „Parametry kinematyczne w procesie walcowania tulei rurowych ze stali wysokostopowych w trójwalcowej walcierce skośnej.” *Hutnik* 1976: 249 ÷ 253.
35. Kawasaki H. „Seamless Stainless Steel Pipe.” 1991.
36. Kazanecki J. *Wytwarzanie rur bez szwu*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2003.
37. Kazanecki J., Madej J. „Siłowe i technologiczne parametry walcowania tulei rurowych ze stali wysokostopowych w trójwalcowej walcierce skośnej.” *Hutnik* 1976: 20÷25.
38. Kazanecki J., Pater Z. „Complex numerical analysis of the tube forming process using diescher mill.” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 58, Iss.3 2013.

39. Kazanecki J., Urbański S. „Assessment of the Strain Distribution in the Rotary Piercing Process by the Finite Element Method.” *J. Mat. Proc. Tech.* 1994, wyd. 45: 335 ÷ 340.
40. Kim H.J., Hwang S.M., Lee. Y. „Analytic model for the prediction of mean effective strain in rod rolling process.” *Journal of Materials Processing Technology* 114 2001: 129 ÷ 138.
41. Knapieński M., Dyja H., Kawalek A., Kwapisz M. „Analysis of the Alternate Extrusion and Multiaxial Compression Process.” *Archives of Metallurgy and Materials* 2015: 149 ÷ 152.
42. Knapieński M., Mróz S. „Komputerowa symulacja procesu walcowania w wykrojach z wykorzystaniem programu komputerowego Forge3®.” *Metalurgia Nr 15, 22-23 września*. Częstochowa, 2000. 9 ÷ 15.
43. Kobayashi S., Li G.J. „Spread analysis in rolling by the rigid-plastic, finite element method.” *Proc. International. Conf. „Numerical methods in industrial forming processes”*. UK, Swansea, 1982. 777 ÷ 786.
44. Koczurkiewicz B., Kwapisz M., Biś J. „Theoretical analysis of the rolling process of a thick-walled thimble in an elongating mill, METAL 2019.” Brno: 28th International Conference on Metallurgy and Materials, 2019.
45. Koczurkiewicz B., Langier T., Chojnacki D., Tałaj G., Tutak P., Czarnocki J., Knapieński M. Zespół mocujący trzpień walcarki pielgrzymowej. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej: Patent Pat.238223. 05 05 2021.
46. Koczurkiewicz B., Mazur I., Biś J. „Defects and Incompatibilities of Pipes Manufactured by Pilgrim Method.” *New Trends in Production Engineering* 2019, wyd. 2: 24 ÷ 35.
47. Komori K. „Rigid-plastic finite-element method for analysis of three-dimensional rolling that requires small memory capacity.” *Int. J. Mech. Sci. Vol. 40, No 5* 1998: 479 ÷ 491.
48. Komori K. „Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing.” *International Journal of Mechanical Sciences* 41 1999: 1499 ÷ 1513.
49. Komori K. „Simulation of ductile fracture behavior in shearing: Effect of ductile fracture criterion.” *Metal Forming* 2000: 563 ÷ 568.
50. Komori K. „Simulation of tensile test by node separation method.” *Journal of Materials Processing Technology, vol. 125 – 126* 2002: 608 ÷ 612.

51. Korczak P., Łabuda E., Koczurkiewicz B. „Numeryczna symulacja kontrolowanego chłodzenia kształtownika łebkowego Ł300 ze stali C15.” *Inżynieria Materiałowa*, nr 6, r. 24; 2003.
52. Krępa L., Kazanecki J. „Analysis of the Process of Bottle Manufacturing in a Piercing Press.” *Metallurgy and Foundry Engineering* 1980: 473 ÷ 490.
53. Lesik L., Mróz S., Dyja H. „Nierównomierność odkształceń ramion kątownika podczas walcowania.” *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, Nr 8-9 2000: 325 ÷ 328.
54. Lesik L., Mróz S., Dyja H. „Peculiarity of the angle bar deformation during hot rolling with different thickness of legs.” *9th International Scientific Conference Achievements In Mechanical & Materials Engineering AMME'2000*. Red. Dobrzański L.A. Gliwice – Sopot – Gdańsk, 2000. 167 ÷ 170.
55. Lobmann W., Grüner P. *Das walzen von Hohlkörpern und das Kalibrieren von Werkzeugen zur Herstellung nahtloser Rohre*. Berlin: Springer Verlag, 1959.
56. Łuksza J. *Elementy ciągarstwa*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2001.
57. Magiera M., Dyja H., Knapieński M., Koczurkiewicz B., Kwapisz M., Kawalek A. „Numerical simulation of the rolling process of pipeline sheet.” *Solid State Phenomena* 2015, wyd. 220-221: 813 ÷ 817.
58. Malinowski Z., Madej W. „Experimental investigation and 3-D FEM simulation of hot rolling in square-oval-square grooves.” *First Esaform Conference on Material Forming, 17-10 March*. Sophia-Antipolis (France), 1998. 157 ÷ 160.
59. Mitkin A.N., Rieznikow A.G., Gołowin W.A. *Wyciskanie metali na zimno*. Warszawa: WNT, 1973.
60. Mróz S. *Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzieleniem pasma*. Seria MONOGRAFIE nr 138, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2008.
61. Mróz S., Dyja H., Koczurkiewicz B. „Modelowanie własności kształtowników łebkowych HP220 podczas walcowania na gorąco i regulowanego chłodzenia.” *Inżynieria Materiałowa*, Nr 3(151), XXVII maj-czerwiec 2006: 757 ÷ 760.
62. Mróz S., Dyja H., Sygut P. „Badanie wpływu kształtu wstępniaka na wypełnienie wykrojów podczas walcowania kątownika 50x50x6 mm.” *Materiały konferencyjne IV Konferencji Naukowej z udziałem uczestników zagranicznych*

WALCOWNICTWO, *Ustroń 15-17 października*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe "Akapit", 2008. 55 ÷ 60.

63. Mróz S., Dyja H., Szota P. „Modelowanie numeryczne walcowania pręta z użebrowaniem śrubowym oraz ocena wpływu pasma przedgotowego na wyrób gotowy.” *Konf. FiMM'2003. Mechanika*, z. 201, 16-17 października. Warszawa, 2003. 67 ÷ 72.
64. Mróz S., Dyja H., Szota P. „Numeryczne modelowanie walcowania kształtownika łeb-kowego HP220.” *Inżynieria Materiałowa*, Nr 3(151), XXVII, maj-czerwiec 2006 2006: 776 ÷ 779.
65. Mróz S., Dyja H., Szota P. „The Numerical Modeling of the Rolling Round Reinforcement Rod and Influence of the Oval Pre-Finished Dimensions on the Height of the Ribs.” *AISTech 2005 Processing of the Iron and Steel Technology Conference Vol. II, May 9-12*. Charlotte, USA, 2005. 573 ÷ 582.
66. Mróz S., Kwapisz M., Milenin A. „Matematyczne modelowanie procesu walcowania pakietowego aluminium.” *XIII Konferencja Informatyka w Technologii Metali, Kom-PlasTech 2006, 15-18 stycznia*. Szczawnica, 2006. 177 ÷ 183.
67. Mróz S., Sawicki S., Dyja H., Sygut P. „Numeryczna weryfikacja kalibrowania walców kątownika równoramiennego o wymiarach 130x12 mm.” *X Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Seria: Materiały Konferencyjne nr 1*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2009. 68 ÷ 72.
68. Mróz S., Stefanik A. „Numeryczne modelowanie pęknięcia w próbie rozciągania.” *IV Międzynarodowa Sesja Naukowa Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Materiały Konferencyjne Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia nr 31*. Częstochowa, 2003. 232 ÷ 235.
69. Mróz S., Stefanik A., Szota P. „Application of numerical modelling to ribbed wire rod dimensions precision increase.” *NUMIFORM 07 AIP Conference Proceedings 908, 17-21 June 2007*. Porto Portugal, brak daty. 1237 ÷ 1242.
70. Norton F.H. *Creep of Steel at High Temperature*. New York: McGraw Hill, 1929.
71. Oberem K. „Das Schrägwalzen als Lochaggregat beim Rohrwalzen.” *Stahl und Eisen 107 (16)* 1987: 799÷736.
72. Oberem K., Frentzen H. „Das neue Mannesmann-Rohrkontiverfahren MRKS.” *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* , 130, 7 1985: 205 ÷ 211.

73. Oberem K., Pfeifer G. „Entwicklung des Rohrkonti-Verfahrens.” *Bänder Bleche Rohre* 21 (6) 1981: 145 ÷ 147.
74. Osakada K., Mori K. „Simulation of Three Dimensional Rolling by the Rigid-Plastic Finite Element Method.” *Proc. International. Conf. “Numerical methods in industrial forming processes”*. UK, Swansea: Pineridge Press, 1982. 747 ÷ 756.
75. Pater Z. *Podstawy metalurgii i odlewnictwa. Podręczniki*. Lublin: Wydawnictwo Politechnik Lubelska, 2014.
76. Pater Z. *Podstawy teoretyczne i badania eksperymentalne procesu walcowania klinowo-rolkowego*. Poznań: Instytut Obróbki Plastycznej, 2007.
77. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., Bartnicki J. „Innovative metal forming technologies.” *Journal of Machine Engineering* 2014: 9 ÷ 11.
78. Pehle H. J., Pitsh J. Leisten T. „The Cross-Roll Piercer as Key Aggregate in Modern Seamless Tube Production Processes.” *Tube and Pipe Technology* 2001: 91÷95.
79. Penkała P. „Metodologia pomiarów istotnych parametrów walcowania skośnego.” *Pomiary Automatyka Robotyka* 2 2011: 792 ÷ 799.
80. Pfeiffer G. „History of the Manufacture of Seamless Tube and the Role of the Investigations of the Brothers Mannesmann.” *Proc. the Third Int. Conf. on Steel Rolling Technology of Pipe and Tube and their Application*. Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 1985. 19÷41.
81. Pietrzyk M. *Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali*. Kraków: Wydawnictwo AGH, 1992.
82. Polek Z., Kazanecki J. „Współczesne ciągle walcowanie rur bez szwu.” *Hutnik* 1976: 272 ÷ 285.
83. Polska Norma PN-EN 10210-1. 27 09 2022.
84. Ritan T., van Luttervelt K., Boisse P. *Friction & Flow Stress in Forming & Cutting*. Kogan Page Limited, 2003.
85. Sadok L., Łuksza J. *Wybrane zagadnienia z ciągarstwa*. Kraków: Wydawnictwo AGH, skrypt nr 1025, 1986.
86. Sadok L., Wosiek L., Morawiecki M. *Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*. Katowice: Wydawnictwo „Śląsk”, 1986.
87. Samołyk G., Pater Z. *Podstawy teoretyczne obróbki plastycznej metali*. Chełm: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie, 2007.

88. Samołyk G., Pater Z. *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2011.
89. Schmidt D. u.a. *Stahlrohr – Handbuch*. Essen: Vulkan-Verlag, 1986.
90. Shimizu T. „Mechanism for Inner Surface Cracking of Stainless Steel in Mannesmann Piercer Rolling.” *CAMP-ISU* 1993: 370 ÷ 373.
91. Sikora K., Janikowski B., Mróz S. „Symulacja i doświadczalne badanie procesu walcowania prętów żebrowanych z wzdłużnym podziałem pasma.” *Walcownictwo 2005 „Procesy Narzędzia Wyroby”*. Ustroń, 2005. 104 ÷ 109.
92. Sińczak J. i inni. *Procesy przeróbki plastycznej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, 2003.
93. Sivaram K., Rao K. P. „A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves.” *Journal of Materials Processing Technology* 37 1993: 295 ÷ 318.
94. Skrzat A., Śliwa R.E. Ryzińska G. „Sprzężona analiza Eulera-Lagrange’a w modelowaniu procesu wyciskania.” *Obróbka Plastyczna Metali* 2015, wyd. XXVI: 73 ÷ 92.
95. Sommer B., Brensing K.H. *Manessmanrakren Werke GmbH*. Steel tube and pipe manufacture process. 10 06 2022. http://www.smrw.de/files/steel_tube_and_pipe.pdf.
96. Stefanik A., Dyja H., Mróz S. „The aplication of the inverse metod for determination of slitting criterion parametr during the multi slit rolling (MSR) process.” *Journal of Materiale Processing Technology* 177 2006: 493 ÷ 496.
97. Stefanik A., Rydz D., Mróz S. „Wykorzystanie i porównanie modeli MES 2D i 3D do symulacji procesu dziurowania rur w prasowalcarce dziurującej.” *Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. Metalurgia* 2003: 228 ÷ 231.
98. Stefanik A., Szota P., Kwapisz M., Wachowski M., Śnieżek L., Gałka A., Szulc Z., Mróz S. „Numerical and experimental modeling of plastic deformation the multi-layer Ti/Al/Mg materials.” *Archives of Metallurgy and Materials* 64 2019: 1361 ÷ 1368.
99. Sygut P., Mróz S., Dyja H., Laber K. „Numeryczna weryfikacja kalibrowania walców do walcowania prętów płaskich o wymiarach 200x6 mm.” *Hutnik – Wiadomości Hutnicze, nr 5* 2010: 214 ÷ 216.

100. Szota P., Dyja H., Mróz S. „Numerical Modeling of Rolling Using Longitudinal Slitting Passes.” *AISTech 2005 Processing of the Iron and Steel Technology Conference Vol. II, May 9-12*. Charlotte, USA, 2005. 775 ÷ 783.
101. Szota P., Mroz S., Dyja H. „3D FEM modeling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod.” *Proceedings of the International Conference AMPT*. Red. Hashmi M. S. J. Olabi A. G. Dublin: Dublin City University, 2003. 359 ÷ 362.
102. Szota P., Mróz S., Dyja H. „3D FEM modelling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod.” *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 2004: 115 ÷ 121.
103. Szota P., Mróz S., Łabuda E. „Deformation in elongating grooves. Naukovi visti, Su-chasti problemy metalurgi.” *Plastichna deformacija metaliv Tom 5* 2002: 211 ÷ 216.
104. Szota P., Mróz S., Łabuda E. „The influence of elongating grooves modification on force – energetic parameters during rolling process.” *Mashinostroenie i Tekhnologija XXI Veka, Sbornik Trudov XII Mezhdunarodnoj Naucno-tekhniceskoy Konferencii, Tom 5*. Doneck, 2005. 128 ÷ 131.
105. Szota P., Mróz S., Stefanik A. „Analysis of the Effect of Rolling Speed on the Capability to Produce Bimodal-Structure AZ31 Alloy Bars in the Three-High Skew Rolling Mill.” *Archives of Metallurgy and Materials* 65 (1) 2020.
106. Szota P., Sygut P., Dyja H., Sawicki S. „Wpływ kąta pochylenia osi walców na warunki odkształcenia prętów bimetalowych w procesie walcowania w trójwalcowej walcarni skośnej.” *X Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Seria Materiały Konferencyjne nr 1*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2009. 64 ÷ 68.
107. Tietierin P. K. *Tieorija popierieczno-wintowej prokatki*. Moskwa: Metallurgija, 1983.
108. Tofil A., Pater Z. „Fem simulation of the tube rolling process in diescher’s mill.” *Advances in Science and Technology, Research Journal* 2014: 51 ÷ 55.
109. Tychowski F. „Siły w procesie wyciskania stali i metali żelaznych.” *Obróbka Plastyczna. Zeszyty CLOP Poznań* 1960.
110. Users Guide Forge3. *Transvalor S.A. Superieure des Mines de Paris*, 2003.

111. Valberg H. S. *Applied Metal Forming INCLUDING FEM ANALYSIS*. Cambridge CB2 8RU, UK,: Cambridge University Press The Edinburgh Building © Henry Valberg, 2010.
112. Voswinckel G. „Developments in the Field of Piercing Bullets for Seamless Tube/making.” *Tube and Pipe Technology* 1991: 20 ÷ 32.
113. Walczuk-Gągała P. *Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia*. Lublin: Monografie – Politechnika Lubelska, 2022.
114. Wasiunyk P. *Walcownictwo i ciągarstwo*. WSiP, 1975.
115. Watkin Ja. L., Hanin M. I., Biba W. I., Kirwalidze N. S., Czekałowicz A. P. *Proszówka w kosowalnikowych stanach*. Moskwa: Metalurgija, 1967.
116. Wesołowski Z. *Podstawy walcowania*. Katowice: WGH, 1960.
117. Winiarski G., Gontarz A. „Numerical and experimental study of producing two-step flanges by extrusion with a movable sleeve.” *Archives of Metallurgy and Materials* 62 (2) 2017: 495 ÷ 499.
118. Wnęk Z., Madej J. *Rurownictwo część I Teoretyczne podstawy i technologia wytwarzania rur stalowych*. Kraków: Wydanie drugie, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica Wydział Metalurgii, Skrypty Uczelnie nr 426, 1974.
119. Wójcik Ł., Walczuk P., Pater Z. „Comparative Analysis of Tube Piercing Processes in the Two-Roll and Three-Roll Mills, Volume 13, Issue 1, March 2019, pages 37÷45.” *Advances in Science and Technology Research Journal* 2019, wyd. 13: 37 ÷ 45.
120. Wusatowski Z. *Podstawy walcowania*. Katowice: Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, 1960.
121. www.autodesk.pl/. 17 04 2024.
122. www.britannica.com/technology/steel/Tubes. 20 05 2022.
123. www.carbo-steel.pl/rury-ze-szwem-spiralnym?lightbox=datatem-iy21mhpi. 22 05 2022.
124. www.enterfea.com/pl/4-najwazniejsze-nieliniowe-modele-materialowe-na-przykladzie-femapa/. 30 04 2024.
125. www.flickr.com/photos/128495906@N07/52118061296. 07 11 2023.
126. www.hydro.com/pl-PL/aluminium/produkty/rury-precyzyjne/rury-wyciskane. 06 06 2022.

127. www.lksteelpipe.com/astm-a409-welded-large-diameter-stainless. 25 05 2022.
128. www.polskiprzemysl.com.pl/cam-cad-cae/podstawy-analazy-mes-w-praktyce/. 30 04 2024.
129. www.rivasoft.pl/rhino-3d-40-id-948. 17 04 2024.
130. www.transvalor.com/en/forge. 11 10 2023.
131. www.youtube.com/watch?v=2vkGWRNmUI4. 23 10 2023.
132. „Wyciskanie części maszyn i wyrobów hutniczych [online].” Politechnika Wrocławska, 15 01 2022. <https://metalplast.pwr.edu.pl/old/pliki/lab2.pdf>.