



Fundusze Europejskie
dla Wielkopolski

Dofinansowane przez
Unię Europejską



SAMORZĄD
WOJEWÓDZTWA
WIELKOPOLSKIEGO



Mechanika i budowa maszyn

**Skrypt dla studentów
studiów niestacjonarnych**

Rok II

redakcja

Robert Cieślak

Konin 2025

Tytuł

Mechanika i budowa maszyn
Skrypt dla studentów studiów niestacjonarnych
Rok II

Redakcja naukowa

Robert Cieślak

Autorzy

Robert Cieślak
Monika Muszyńska
Edward Pająk
Aleksandra Pertek-Owsianna
Robert Roszak

Projekt pn.
„Rozwój studiów o profilu praktycznym i form kształcenia ustawicznego
dostosowanych do potrzeb Wielkopolski Wschodniej”,
realizowany przez Akademię Nauk Stosowanych w Koninie,
jest współfinansowany przez Unię Europejską
ze środków Funduszu na rzecz Sprawiedliwej Transformacji
w ramach programu Fundusze Europejskie dla Wielkopolski 2021-2027



Fundusze Europejskie
dla Wielkopolski

Dofinansowane przez
Unię Europejską

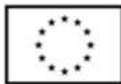


SAMORZĄD
WOJEWÓDZTWA
WIELKOPOLSKIEGO



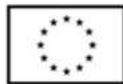
Wydawca

Akademia Nauk Stosowanych w Koninie
ul. Przyjaźni 1, 62-510 Konin



Spis treści

1. Naprawa geometrii CAD i siatki MES w procesie modelowania i symulacji (Robert Roszak)	5
1.1. Wstęp	5
1.2. Cel zadania	7
1.2.1. Wymagane umiejętności	7
1.2.2. Zdobyte umiejętności	7
1.2.3. Problemy do rozwiązania	7
1.3. Naprawa geometrii CAD 3D i siatki MES	9
1.4. Proces importu geometrii	11
1.5. Wprowadzenie do zestawu narzędzi <i>Meshing Toolbox</i>	12
1.6. Identyfikacja krótkich krawędzi, małych powierzchni	12
1.7. Łączenie krótkich krzywych	13
1.8. Dynamiczna zmiana wielkości siatki	14
1.9. Usuwanie małych powierzchni	18
1.10. Podział powierzchni za pomocą krzywej	20
1.11. Odwzorowanie (mapowanie) czworościanu	26
1.12. Odsunięcie krawędzi – podkładka	30
1.13. Interakcyjna zmiana kształtu	34
1.14. Generacja siatki objętościowej na podstawie siatki powierzchniowej	39
1.15. Przykłady dodatkowe	42
1.16. Podsumowanie	43
2. Projektowanie procesów produkcyjnych w mechanice i budowie maszyn (Robert Cieślak)	45
2.1. Zagadnienia teoretyczne z przykładami	45
2.2. Rodzaje produkcji	46
2.3. Formy organizacyjne produkcji	46
2.4. Projektowanie procesu technologicznego	48
2.4.1. Obliczenie programu produkcyjnego montażu	48
2.4.2. Przykładowe wzory	49
2.5. Rodzaje półfabrykatów	50
2.6. Omówienie podstawowego zaplecza technicznego (parku maszynowego)	51
2.7. Dobór obrabiarki	51
2.8. Wybór pomocy warsztatowych	52
2.9. Przykładowy park maszynowy	53
2.10. Opracowanie dokumentacji technicznej	54
2.10.1. Strona tytułowa	54
2.10.2. Analiza technologiczności konstrukcji	55
2.10.3. Karta technologiczna montażu	56
2.10.4. Karta instrukcyjna montażu	57
2.10.5. Schemat montażu zespołu	58
2.10.6. Rysunek zespołu do montażu	59
2.11. Przykłady wypełnienia dokumentacji technicznej	60



3.	Obróbka ubytkowa (<i>Edward Pająk</i>)	80
3.1.	Wprowadzenie – zakres tematyczny rozdziału	80
3.2.	Technologie kształtujące	82
3.2.1.	Proces obróbki skrawaniem	83
3.2.2.	Procesy obróbki erozyjnej	01
4.	Tworzywa sztuczne i kompozyty (<i>Aleksandra Pertek-Owsianna</i>)	99
4.1.	Wprowadzenie	99
4.2.	Definicje polimeru, tworzywa sztucznego, polimeryzacji, polikondensacji, poliaddycji, kopolimeryzacji, reakcje polimeryzacji	100
4.2.1.	Tworzywa sztuczne	101
4.2.2.	Polimeryzacja, polikondensacja, poliaddycja, kopolimeryzacja	102
4.2.3.	Budowa i struktura polimerów, stopień polimeryzacji i krystaliczności	102
4.2.4.	Reakcje polimeryzacji	103
4.3.	Podział polimerów	106
4.4.	Stan fizyczny polimerów a właściwości	107
4.5.	Charakterystyka wybranych materiałów polimerowych	108
4.5.1.	Tworzywa termoplastyczne	108
4.5.2.	Duroplasty	113
4.5.3.	Elastomery	116
4.5.4.	Polimery – depolimeryzacja, degradacja, recykling	118
4.6.	Kompozyty	119
4.6.1.	Klasyfikacja kompozytów	119
4.6.2.	Właściwości kompozytów	120
4.6.3.	Materiały stosowane na osnowy kompozytów	120
4.6.4.	Materiały stosowane do umocnienia kompozytów	121
4.6.5.	Postaci, kształty i wymiary cząstek i włókien stosowanych na kompozyty	122
4.6.6.	Właściwości mechaniczne polimeru oraz kompozytu polimer – włókno w próbie rozciągania	123
4.6.7.	Przykłady właściwości i zastosowania wybranych kompozytów	127
4.6.8.	Nanokompozyty	128
4.6.9.	Biokompozyty polimerowe	129
5.	Przetwórstwo tworzyw sztucznych (<i>Monika Muszyńska</i>)	132
5.1.	Wprowadzenie	132
5.2.	Podział tworzyw sztucznych ze względu na właściwości użytkowe	135
5.3.	Wytłaczanie tworzyw sztucznych	136
5.4.	Wtryskiwanie tworzyw sztucznych	141
5.5.	Przyszłość tworzyw sztucznych	142
5.6.	Przykłady badań	146



Robert Roszak

Rozdział 1. Naprawa geometrii CAD i siatki MES w procesie modelowania i symulacji

1.1. Wstęp

Modelowanie i symulacja komputerowa to proces tworzenia komputerowych reprezentacji (modeli) rzeczywistych systemów lub zjawisk, tak aby następnie badać, przewidywać lub optymalizować ich zachowanie za pomocą symulacji komputerowej. Modelowanie to tworzenie reprezentacji, a symulacja to uruchamianie tego modelu na komputerze, aby zobaczyć, jak się zachowuje w różnych warunkach. Aspekt modelowania i symulacji możemy podzielić na:

- Proces modelowania – to proces tworzenia uproszczonej, często matematycznej i fizycznej, reprezentacji rzeczywistego systemu lub zjawiska. Modelowanie może obejmować tworzenie modeli matematycznych, graficznych, logicznych lub innych reprezentacji, które odzwierciedlają najważniejsze aspekty zjawiska.
- Proces symulacji – to uruchamianie modelu na komputerze i obserwacja jego zachowania w różnych warunkach, często w celu przewidywania przyszłego stanu systemu lub optymalizacji jego działania. Symulacja może być używana do badania wpływu różnych zmiennych na system, testowania różnych scenariuszy i podejmowania decyzji.

Główne zastosowania modelowania i symulacji komputerowej to dziedziny nauki takie jak fizyka, inżynieria, biznes, medycyna, nauki społeczne i wiele innych. Do najważniejszych zalet stosowania narzędzi modelowania i symulacji zalicza się:

- przewidywanie zachowania systemów przed ich budową lub uruchomieniem,
- optymalizację działania systemów,
- testowanie różnych scenariuszy i podejmowanie decyzji,
- ułatwienie zrozumienia złożonych systemów,
- zmniejszenie kosztów i ryzyka związanych z prototypowaniem i testowaniem realnych systemów.

Jedną z powszechnie stosowanych w procesie symulacji jest metoda elementów skończonych (MES). To narzędzie używane w obliczeniach numerycznych, polegające na specyficznej dyskretyzacji domeny obliczeniowej na tzw. elementy skończone, wykorzystuje lokalny układ współrzędnych, proste funkcje wielomianowe oraz macierz Jacobiego. Pozwala transformować zdeformowane elementy skończone w proste, jednakowe i foremne odpowiedniki, upraszczając przy tym obliczenia. Stosowana początkowo w mechanice, bardzo szybko znalazła zastosowanie w innych dziedzinach, m.in. w przepływie ciepła. Warto podkreślić, że system (program) oparty na MES oferuje wiele alternatywnych możliwości budowania modelu i równie wiele parametrów rozwiązania. Oferuje też narzędzia do badania wyników i testowania ich jakości. Jedynym przewodnikiem umożliwiającym dokonywanie wyboru między licznymi opcjami menu jest wiedza o MES (poparta wiedzą przynajmniej z teorii sprężystości i plastyczności), bowiem w każdej z tych grup zagadnień można popełnić



błędy. Ważną informacją jest, że twórcy systemu ułatwiają ten wybór przez ustawienie opcji i parametrów domyślnych. Niestety, zwykle – nawet w prostych przypadkach – wyboru powinien dokonać użytkownik. Zaczyna się to już przy typie elementu skończonego, a kończy na hipotezie wyężeniowej do wykresu naprężeń. Rozdział ten jest adresowany do potencjalnego lub faktycznego użytkownika takiego oprogramowania, który nie zna MES, ale jest w stanie zrozumieć jej zasadnicze przesłanie. Poniższy rozdział zawiera zadania wprowadzające studentów w bardzo istotne kwestie związane z naprawą geometrii CAD oraz poprawą jakości siatki MES. Jest to istotny problem w procesie modelowania i symulacji mechanizmów i konstrukcji. Rozdział został podzielony na trzy części: wprowadzenie (dla prowadzącego), przykłady (dla studentów), zadania dodatkowe (dla studentów). Tematyka ta przeznaczony jest na kilka zajęć laboratoryjnych.

1.2. Cel zadania

Student po wykonaniu przedstawionych przykładów (rys. 1.1-1.3) będzie umiał naprawić Siatkę Elementów Skończonych lub polepszyć jej jakość. Będzie umiał naprawić zaimportowaną geometrię CAD.

1.2.1. Wymagane umiejętności

- Student przed przystąpieniem do zajęć musi posiadać umiejętność modelowania przestrzennego w jednym z programów CAD (preferowany jest **SolidWorks** lub **Inventor**)

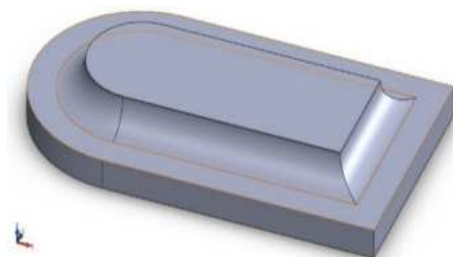
1.2.2. Zdobyte umiejętności

- Współpraca pomiędzy oprogramowaniem CAD (SolidWorks) a CAE (Femap/Nastran)
- Wyświetlanie jakości siatki MES
- Dynamiczna modyfikacja liczb węzłów/elementów modelu
- Identyfikacja krótkich krzywych i małych powierzchni
- Usuwanie krótkich krzywych i małych powierzchni
- Dzielenie powierzchni krzywą
- Odwzorowanie (mapowanie) czworoboku na powierzchni
- Dzielenie powierzchni poprzez dodawanie odsunięcia krawędzi – podkładka
- Interakcyjna zmiana kształtu elementu MES
- Generacja siatki objętościowej na podstawie siatki powierzchniowej

1.2.3. Problemy do rozwiązania

Przykład nr 1

Wygenerować automatycznie siatkę MES, a następnie wprowadzić korekty.

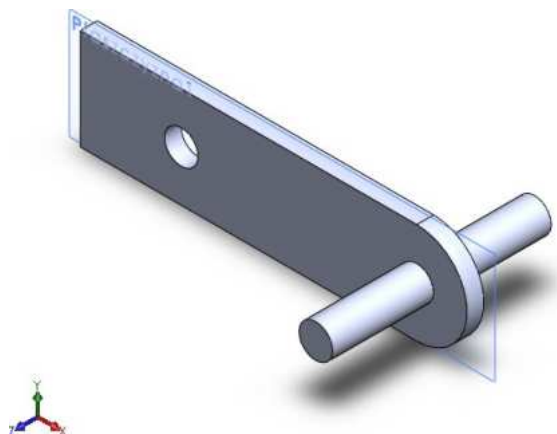


Rys. 1.1. Widok geometrii – przykład 1



Przykład nr 2

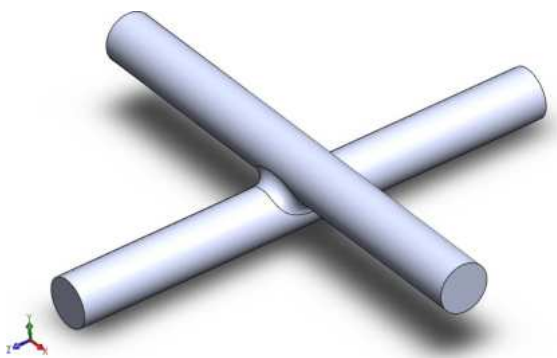
Użyć elementy skończone typu **QUAD** na powierzchni.



Rys. 1.2. Widok geometrii – przykład 2

Przykład nr 3

Użyć elementy skończone typu **QUAD** na powierzchni, a następnie **TETRA** w objętości.



Rys. 1.3. Widok geometrii – przykład 3

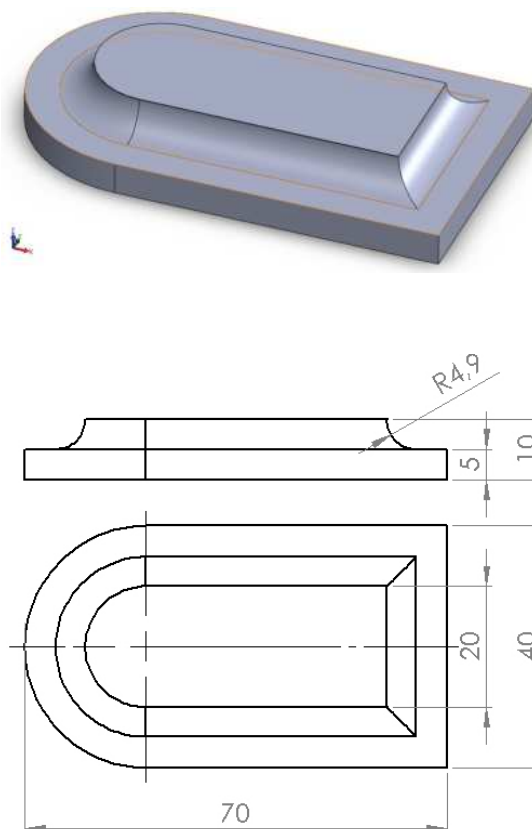
1.3. Naprawa geometrii CAD 3D i siatki MES

Celem tego ćwiczenia jest generacja/poprawa jakości siatki MES lub/i naprawa geometrii CAD. Podczas wykonywania ćwiczeń student jest proszony o wprowadzenie właściwości materiałowych - przykładowe wartości dla stali:

- moduł Young'a – $E = 2,1 \cdot 10^{11} [Pa]$,
- liczba Poissona – $\nu = 0,3$,
- gęstość – $\rho = 7800 [\frac{kg}{m^3}]$

Przykład nr 1

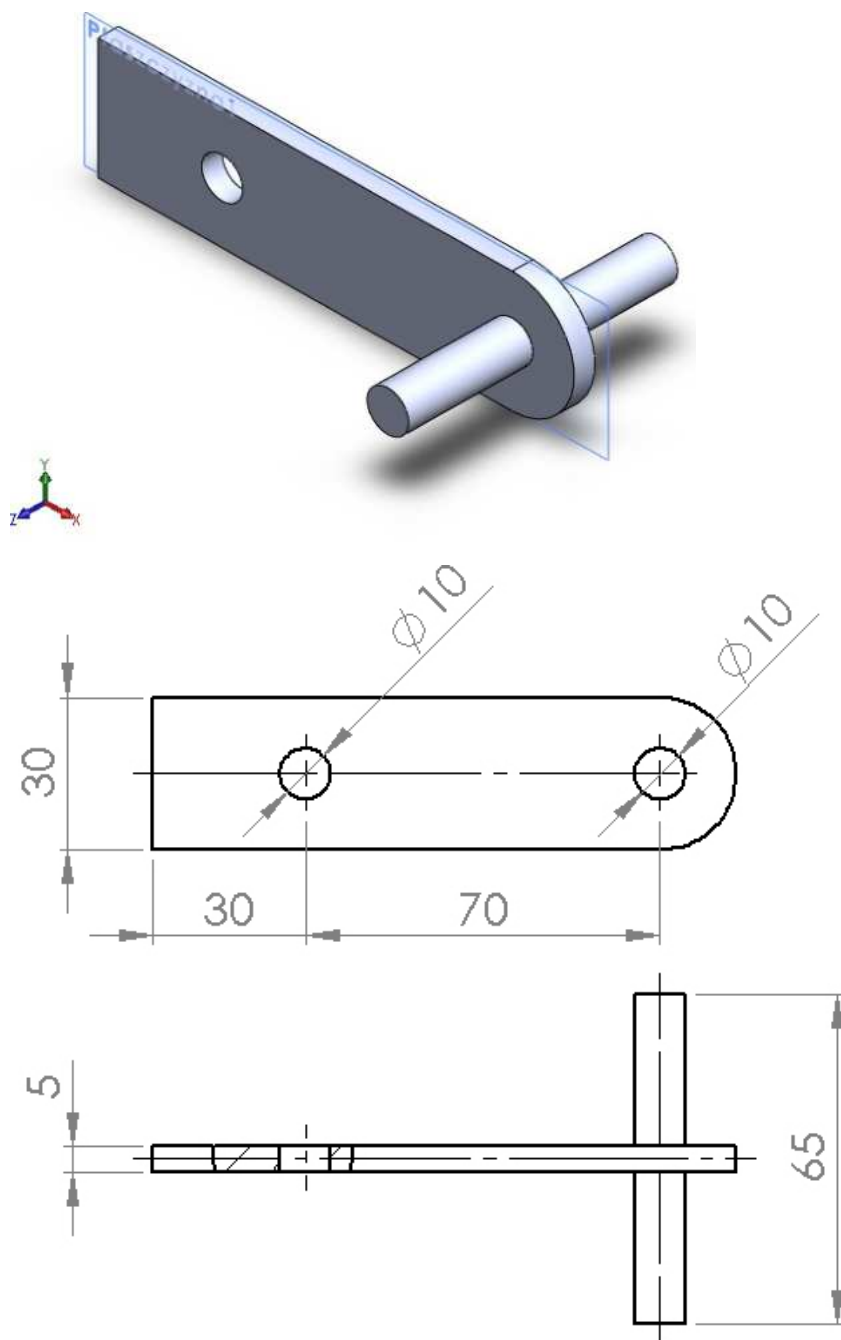
Wygenerować automatycznie siatkę MES dla geometrii poniżej, a następnie wprowadzić korekty.



Rys. 1.4. Widok geometrii wraz z wymiarami – przykład 1

Przykład nr 2

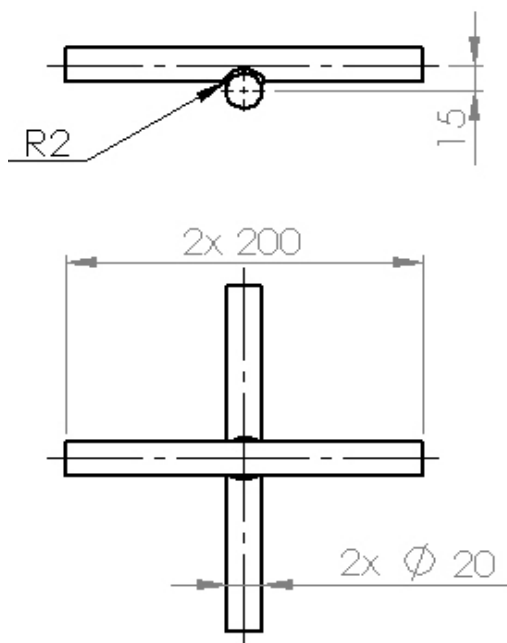
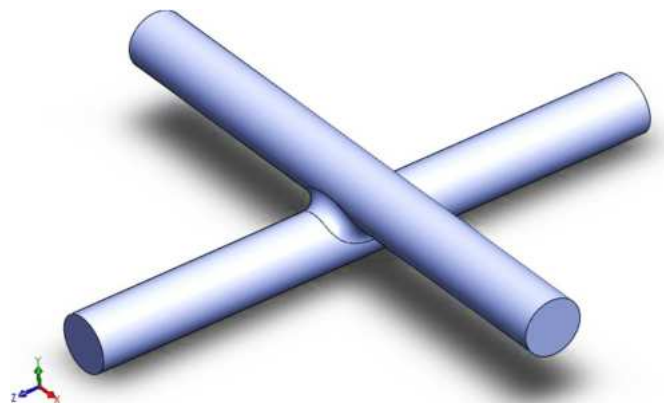
Użyć elementy skończone typu **QUAD** na powierzchni dla geometrii poniżej (geometria dostępna również do pobrania).



Rys. 1.5. Widok geometrii wraz z wymiarami – przykład 2

Przykład nr 3

Użyć elementy skończone typu **QUAD** na powierzchni, a następnie **TETRA** w objętości dla geometrii poniżej (geometria dostępna również do pobrania).



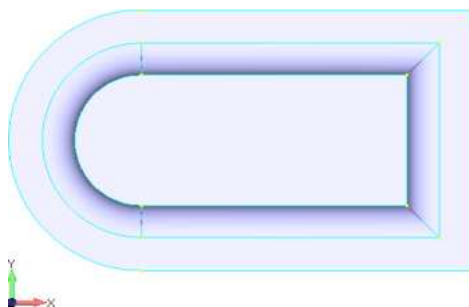
Rys. 1.6. Widok geometrii wraz z wymiarami – przykład 3

1.4. Proces importu geometrii

W celu poprawnego zaimportowania geometrii do programu Femap należy zmienić domyślne ustawienia jednostek, w jakim model CAD zostanie zaimportowany. W tym celu w programie **Femap** wybierz **File, Preferences...** W oknie ustawień wybierz zakładkę **Geometry/Model**, a następnie w polu **Geometry Preferences** przy **Solid Geometry Scale Factor** wybierz **1..Meters**. Kliknij **OK**. Wybierz **File, Import, Geometry.....** i wskaż zapisaną geometrię w formacie natywnym programu SolidWorks (*.sldprt) – wybierz geometrię zadania nr 1. Kliknij **OK**.



W przypadku geometrii utworzonej w programie innym niż SolidWorks, formatem wymiany jest Parasolid (*.x t) _



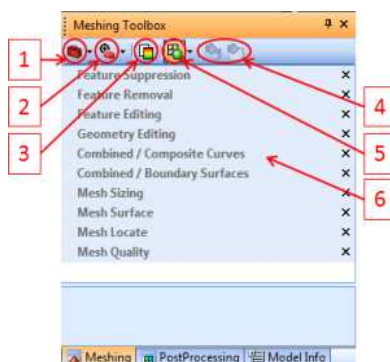
Rys. 1.7. Widok geometrii po imporcie do systemu Feap



Zapisz zmiany **File, Save**.

1.5. Wprowadzenie do zestawu narzędzi *Meshing Toolbox*

Aktywuj panel *Meshing Toolbox* (rys. 1.8), klikając na zakładkę **Meshing** obok **Post Processing / Model Info**. Jeżeli panel jest niewidoczny, wybierz z menu głównego **Tools, Meshign Toolbox**. Dodatkowo uaktywnij panel *Entity Info*, z menu głównego **Tools**.

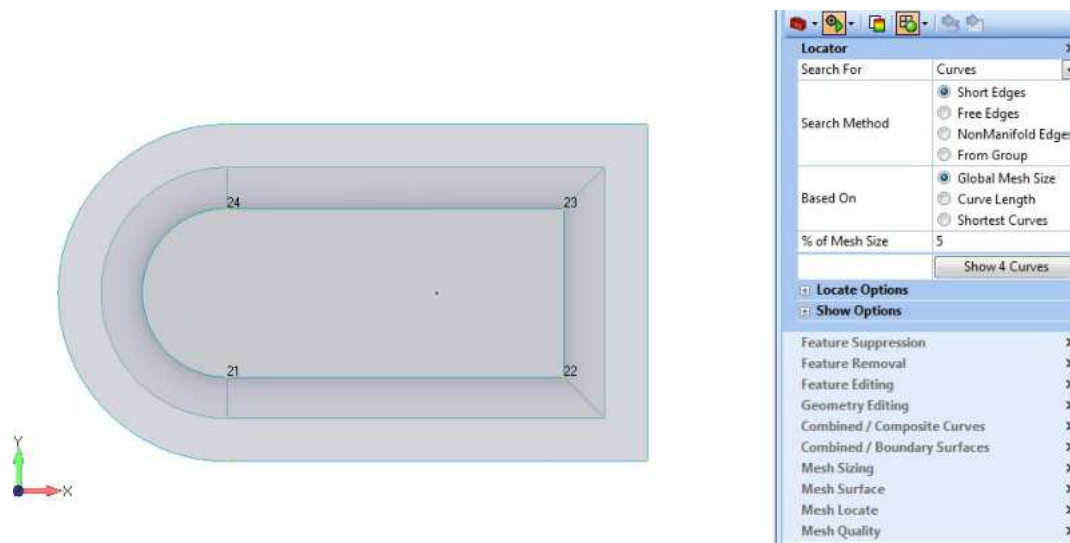


Rys. 1.8. Femap – zestaw narzędzi „Meshing Toolbox”:

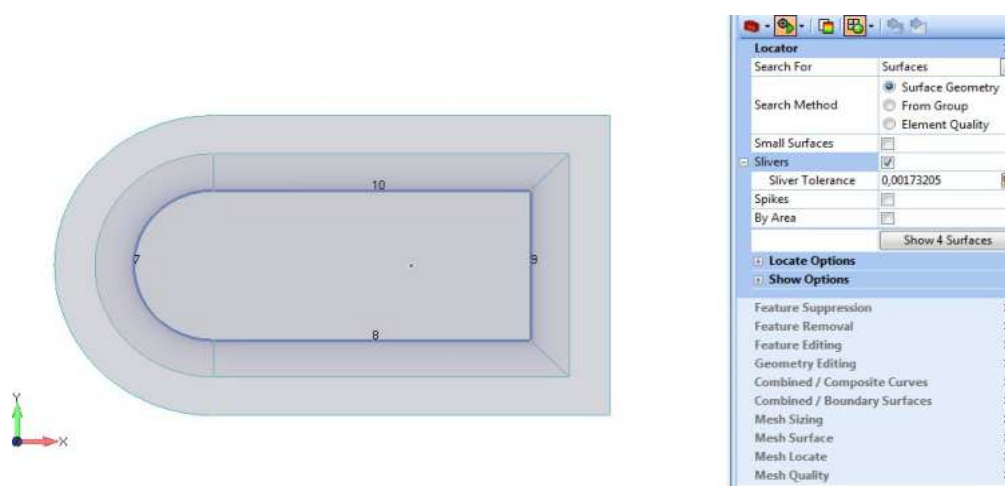
- 1 – ustawienia panelu *Meshing Toolbox*;
- 2 – opcja lokalizowania (np. krótkich krawędzi), po włączeniu jej – klikając kolejny raz przełącza się pomiędzy kolejnymi zlokalizowanymi wystąpieniami niewłaściwej geometrii;
- 3 – wyświetla jakość siatki MES;
- 4 – włącza/wyłącza dynamiczną modyfikację siatki;
- 5 – uaktywnia opcję dynamicznego zaznaczania;
- 6 – dostępne narzędzia.

1.6. Identyfikacja krótkich krawędzi, małych powierzchni

Z opcji *Meshing Toolbox* wybierz opcję lokalizowania (rys. 1.9-1.10). Domyślnie zaznaczona jest opcja wyszukiwania krótkich krawędzi (**Search For: Curves** i **Search Method: Search Method**). Algorytm programu wyszukuje wszystkie krawędzie, które stanowią mniej niż 5% wielkości siatki MES (**Based On: Global Mesh Size** i **% of Mesh Size: 5**).



Rys. 1.9. Femap – zestaw narzędzi „Meshing Toolbox”

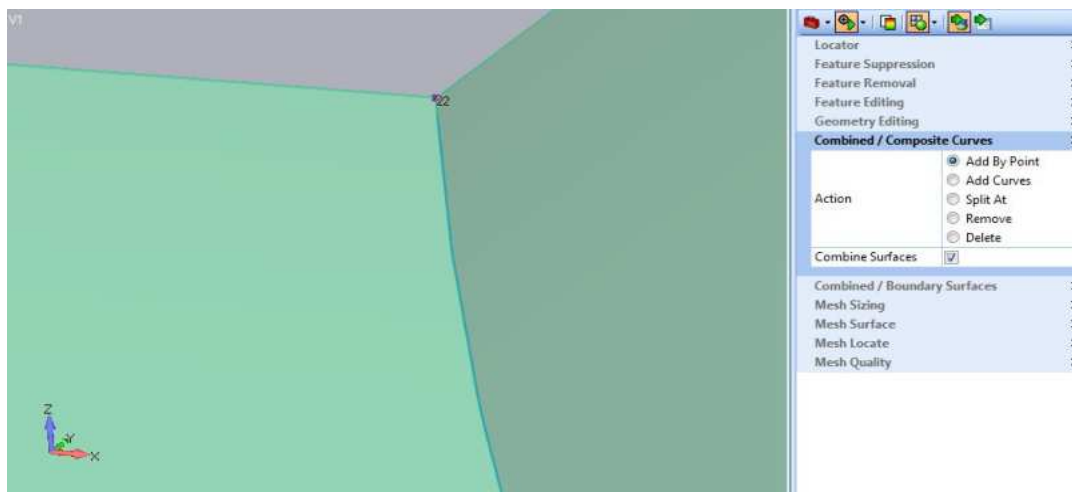


Rys. 1.10. Femap – zestaw narzędzi „Meshing Toolbox”

Klikając ponownie na opcję lokalizowania program centruje na ekranie znalezione krzywe – można wykonać zbliżenie i swobodnie przełączać pomiędzy kolejnymi krzywymi. Wybierz **Search For: Surfaces** i zaznacz opcję **Slivers**, aby program znalazł małe powierzchnie.

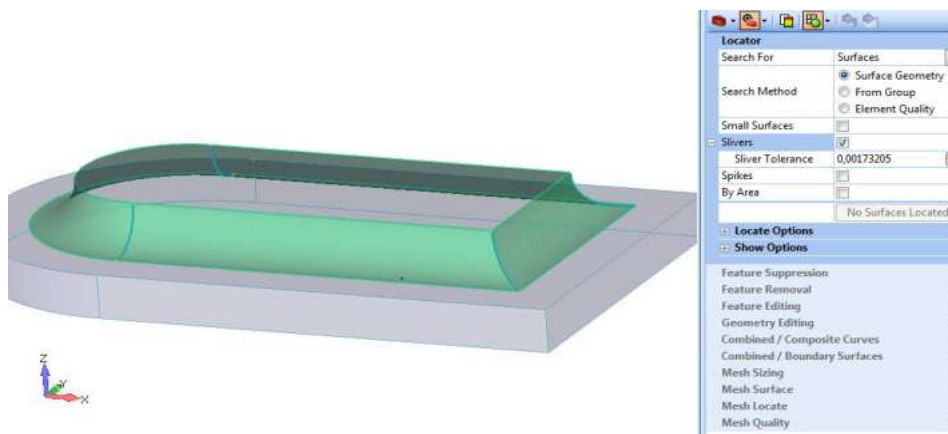
1.7. Łączenie krótkich krzywych

Ponownie wyszukaj krótkie krawędzie i powiększ widok na jedną z nich. Wybierz narzędzie **Combined / Composite Curves**. Umożliwi ono połączenie dwóch krzywych w jedną. Zaznacz opcję **Action: Add By Point**, następnie włącz opcję wybierania (rys. 1.11) i wskaż punkt na połączeniu krótkiej krzywej i łuku. Przy zaznaczonej opcji **Combine Surfaces** program połączy sąsiednie powierzchnie w jedną. Efekt przedstawiono na rysunku 1.11.



Rys. 1.11. Femap – zestaw narzędzi naprawy geometrii

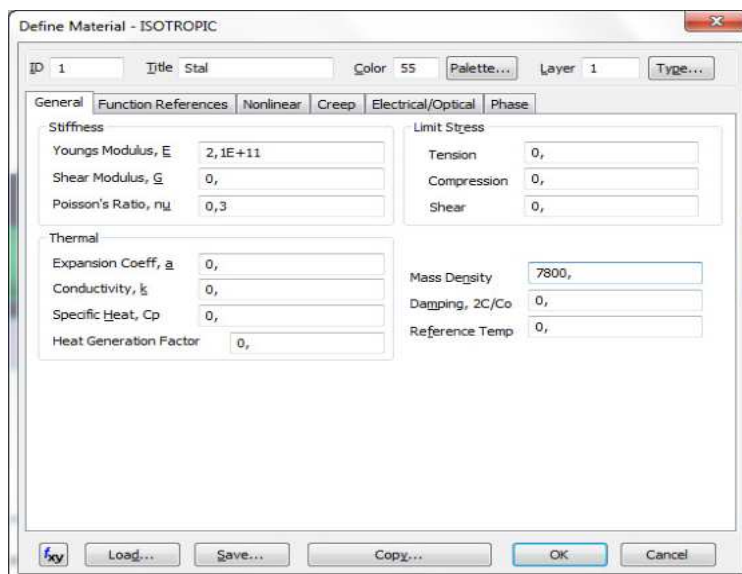
Wybierz przycisk lokalizowania (rys. 1.12), aby przełączyć do kolejnej krótkiej krzywej. Połącz ją z krawędzią łuku. Wykonaj tą operację dla pozostałych krzywych. Po zakończeniu wybierz narzędzie **Locator**, **Search For: Surfaces** i zaznacz opcję **Slivers**. Algorytm programu nie znajduje małych powierzchni, co świadczy o dobrze wykonanym zadaniu.



Rys. 1.12. Femap – zestaw narzędzi naprawy geometrii

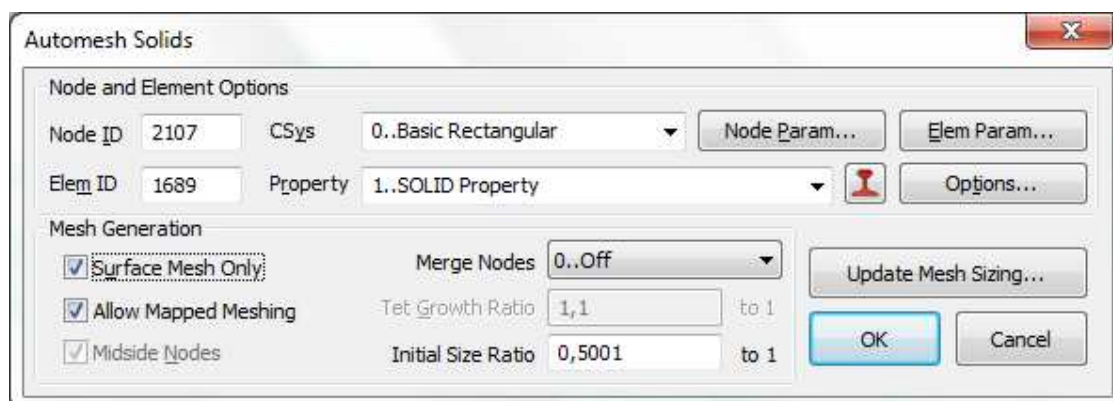
1.8. Dynamiczna zmiana wielkości siatki

W celu automatycznego wygenerowania siatki objętościowej MES, wybierz z menu głównego **Mesh, Geometry, Solids....** W oknie **Define Material – ISOTROPIC** wprowadź wartości dla stali, w polu **Title** wprowadź nazwę, np. *Stal*. Kliknij **OK**.



Rys. 1.13. Widok karty materiału

W oknie **Automesh Solids** (rys. 1.14) zaznacz opcję **Surface Mesh Only** w polu *Mesh Generation*. Kliknij **OK**.



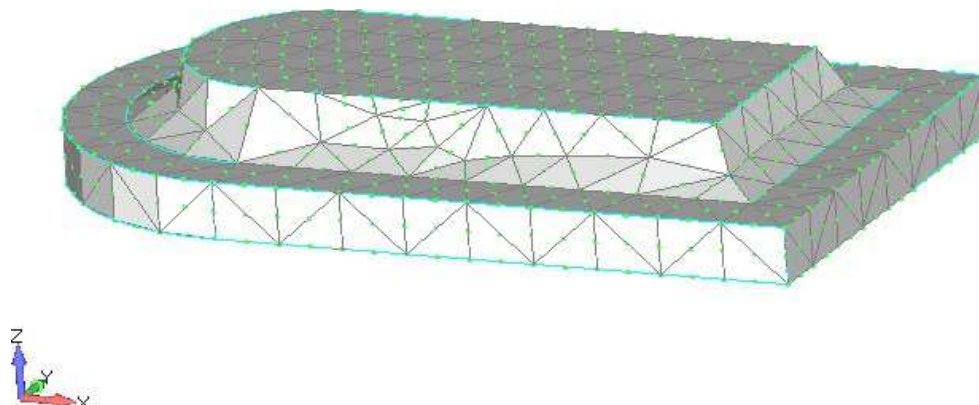
Rys. 1.14. Widok karty materiału

Na pasku **Entity Display** odznacz widoczność powierzchni.





Model powinien wyglądać następująco:

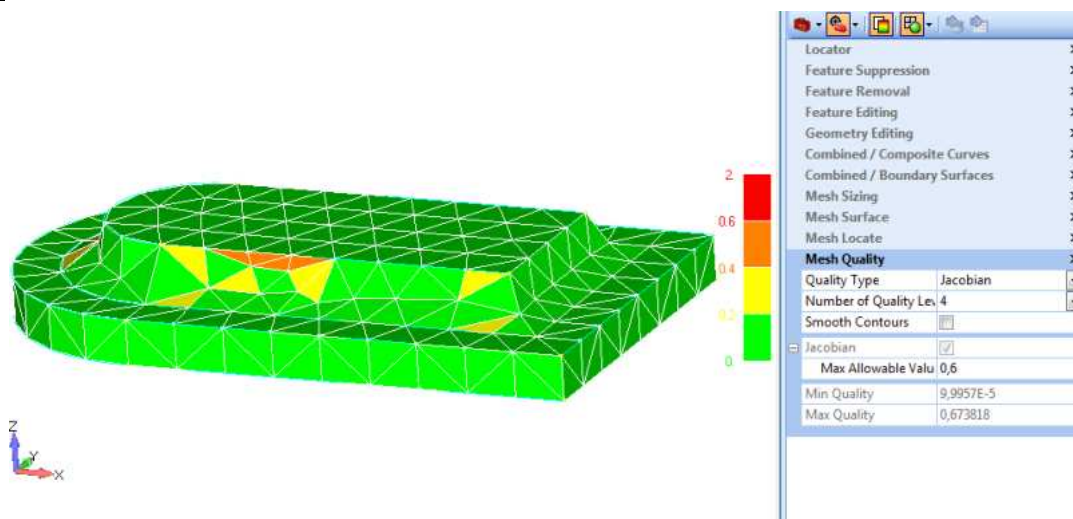


Rys. 1.15. Widok siatki dla modelu – przykład 1

Włącz widoczność jakości siatki (rysunki poniżej). W *Meshing Toolbox* (rys. 1.16) wybierz narzędzia **Mesh Quality**. Z menu **Number of Quality Level** wybierz **4**. Jakość siatki jest teraz definiowana na podstawie Jakobianów w danym elemencie.

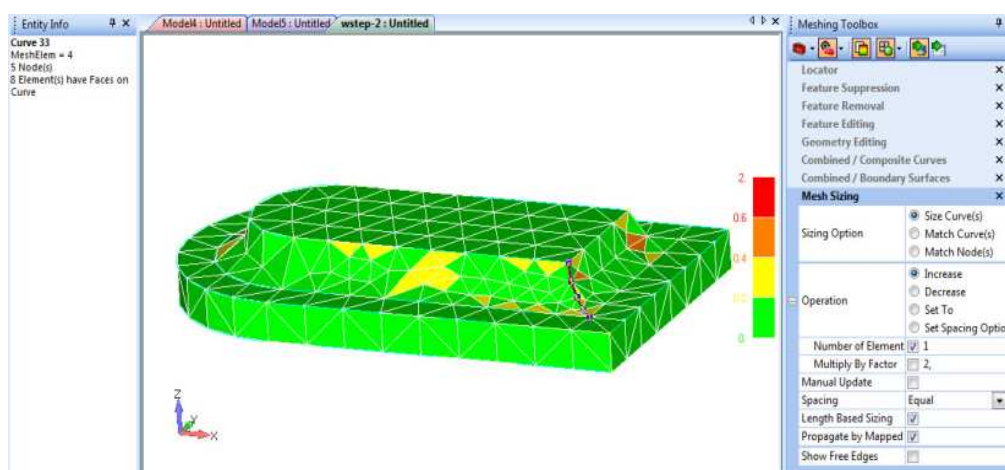


Przekroczenie progu 0.6 oznacza zdegenerowany element.



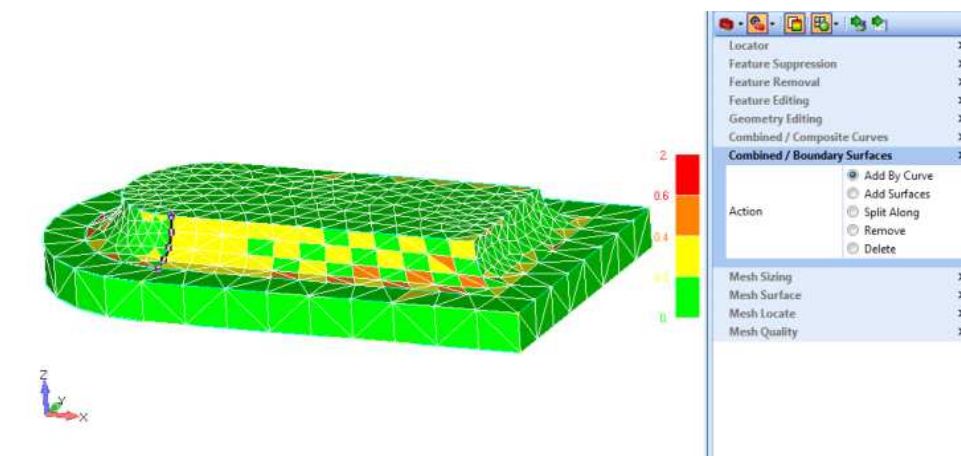
Rys. 1.16. Narzędzie kontroli jakości siatki

Wybierz narzędzie **Mesh Sizing**. Opcje **Sizing Option: Size Curve(s)** oraz **Operation: Increase** oznaczają zwiększenie liczby elementów o jeden, po wskazaniu i kliknięciu na krzywą. Włącz opcję dynamicznej modyfikacji siatki (rys. 1.16) oraz opcję zaznaczania (rys. 1.17). Po wskazaniu dowolnej krzywej-krawędzi modelu w panelu **Entity Info** wyświetlana jest informacja o liczbie elementów i węzłów. Zwiększ liczbę węzłów na jednej z krzywej-zaokrągleniu o 2.



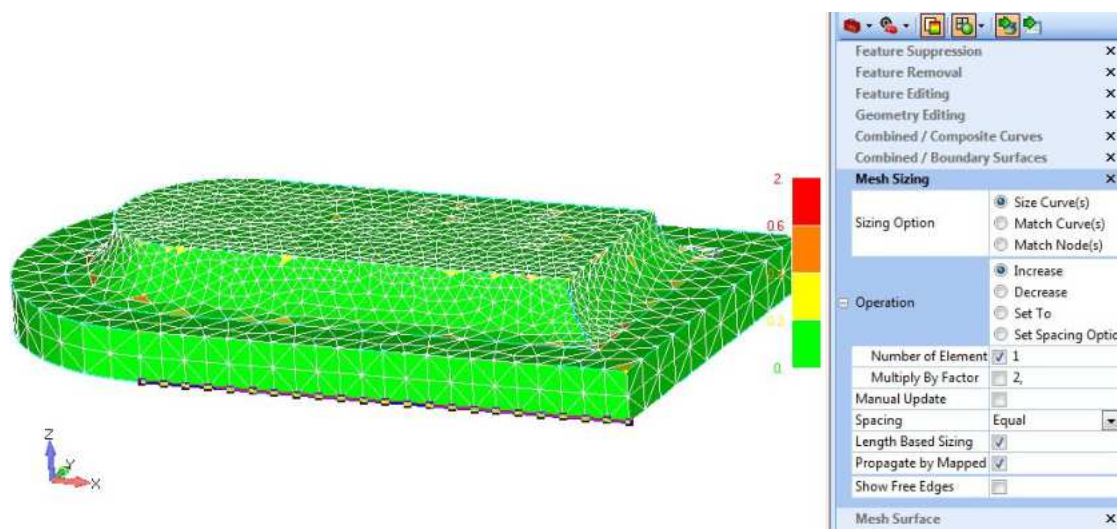
Rys. 1.17. Narzędzie kontroli jakości siatki

Wybierz narzędzie **Combined / Boundary Surfaces** i zaznacz opcję **Action: Add By Curve** w celu połączenia dwóch powierzchni w jedną, poprzez usunięcie łączącej ją krzywej. Wskaż krzywą na zaokrągleniu jak na rys. 1.18.



Rys. 1.18. Narzędzie kontroli jakości siatki

Połącz powierzchnie po przeciwnej stronie elementu. Zwiększ liczbę węzłów na każdej z krawędzi w celu uzyskania wymaganej jakości siatki MES – narzędzie **Mesh Sizing**.



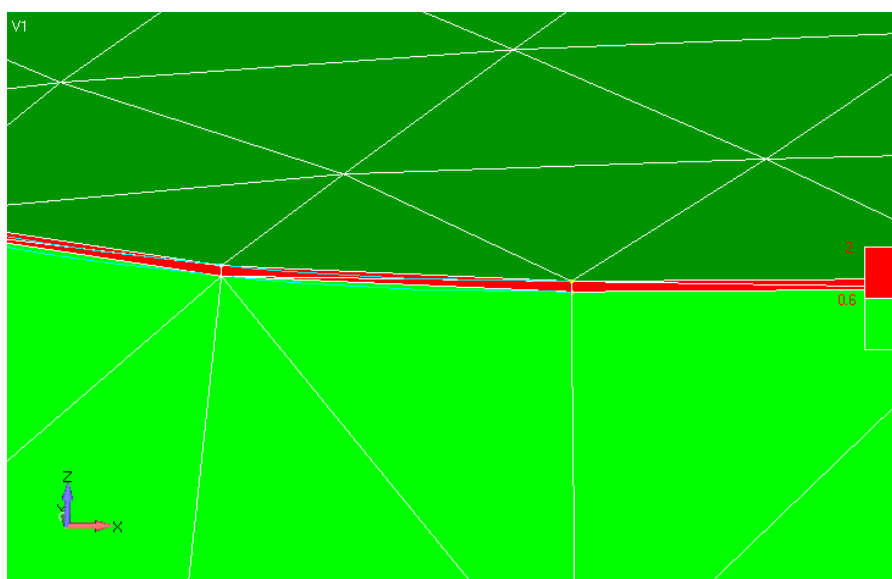
Rys. 1.19. Narzędzie kontroli jakości siatki



Zapisz zmiany.

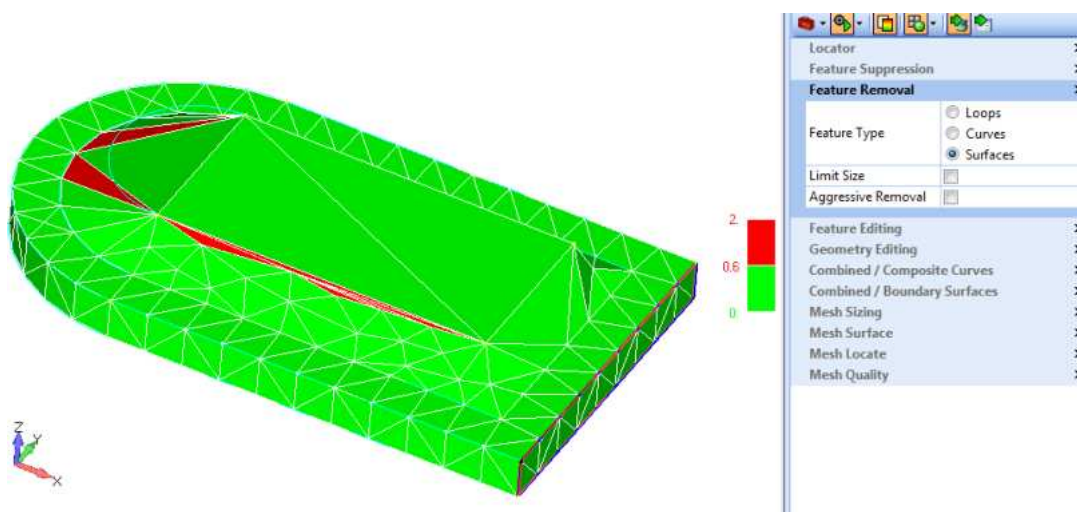
1.9. Usuwanie małych powierzchni

Otwórz nowe zadanie **File, New** i zaimportuj jeszcze raz przykład nr 1. Utwórz trójkątną siatkę powierzchniową MES (**Tri**) i wyświetl jej jakość.



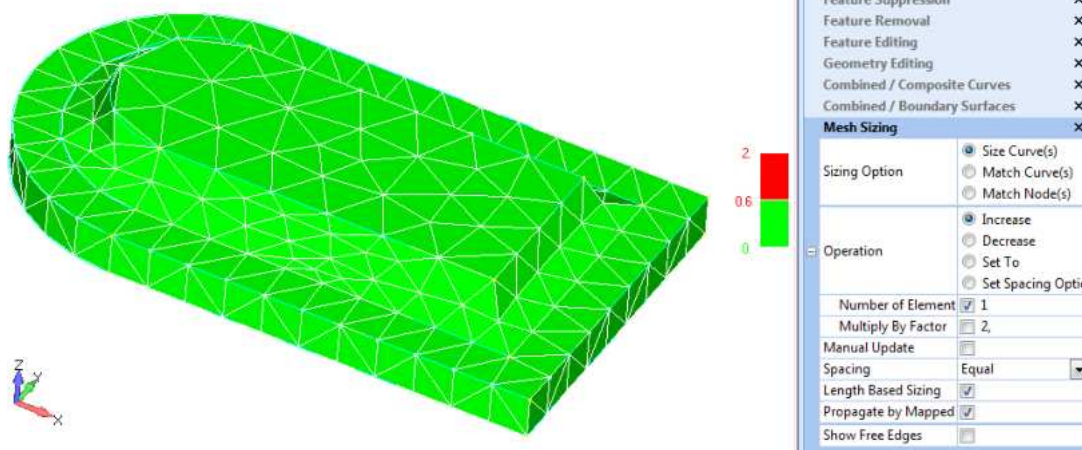
Rys. 1.20. Narzędzie „Meshing Toolbox”

W *Meshing Toolbox* wybierz zestaw narzędzi **Feature Removal**. Zaznacz **Feature Type: Surface** oraz włącz zaznaczanie (rys. 1.20). Następnie na ekranie wskaż małą powierzchnię – zostanie podświetlona, kliknij w tym miejscu – powierzchnia zostanie usunięta.



Rys. 1.21. Narzędzie „Meshing Toolbox”

Należy teraz zwiększyć liczbę węzłów/elementów na górnych krawędziach modelu – narzędzie **Mesh Sizing**.



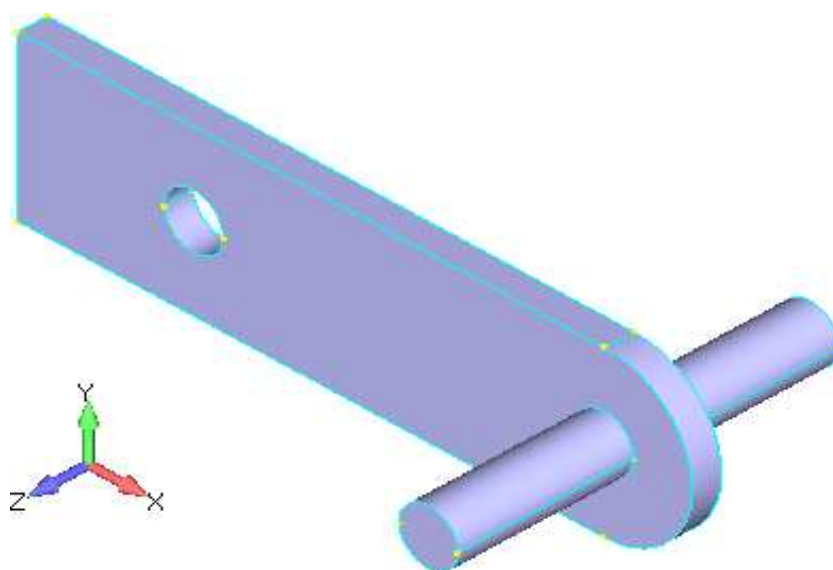
Rys. 1.22. Narzędzie „Meshing Toolbox”



Zapisz zmiany.

1.10. Podział powierzchni za pomocą krzywej

Otwórz nowe zadanie **File, New**. Zaimportuj geometrię do przykład nr 2 (rys. 1.23).



Rys. 1.23. Widok geometrii po imporcie – przykład 2

Włącz widoczność pasków: **Mesh, Curves on Surfaces** klikając PPM (prawym przyciskiem myszy) na dowolny pasek.

Wybierz narzędzie **Split Point to Edge**.

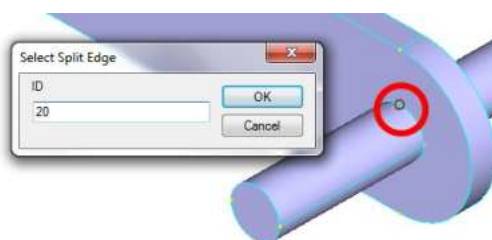


W oknie **Select Split Point** wskaż na ekranie punkt, jak pokazano na rys. 1.24. Kliknij **OK**.



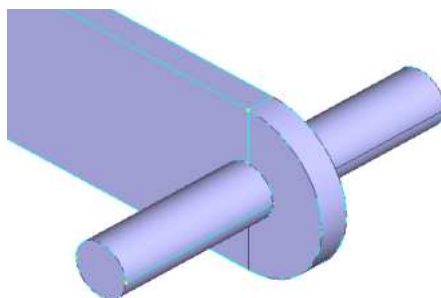
Rys. 1.24. Narzędzie „Split Point”

W oknie **Select Split Edge** wskaż na ekranie krzywą przy walcu, jak na rys. 1.25. Kliknij **OK**.



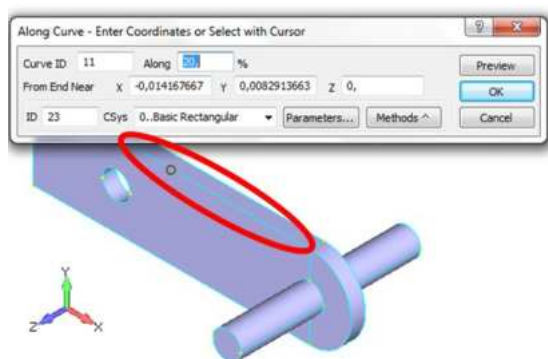
Rys. 1.25. Narzędzie „Split Edge”

Zrób to samo po drugiej stronie walca. Geometria powinna wyglądać jak na rys. 1.26.



Rys. 1.26. Widok modelu po podziale geometrii

Z menu głównego wybierz **Geometry, Point...** W oknie **Locate – Enter Coordinates or Select with Cursor** kliknij przycisk **Methods ^** i wybierz **Along Curve**. W oknie **Along Curve - Enter Coordinates or Select with Cursor** kliknij w polu *Curve ID* i na ekranie wskaż krzywą, klikając na prawym jej końcu (jak na poniższym rysunku). W polu **Along** wpisz 20%. Punkt zostanie wprowadzony na 20% długości krzywej, licząc od końca, w którym została wybrana krzywa. Kliknij **OK**.

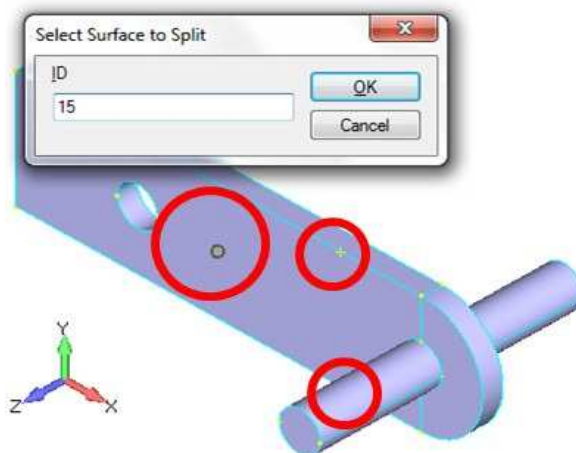


Rys. 1.27. Narzędzie wyboru krawędzi

Zrób to samo z krzywą po drugiej stronie walca. Z paska **Curves on Surfaces** wybierz **Split Between Points**.

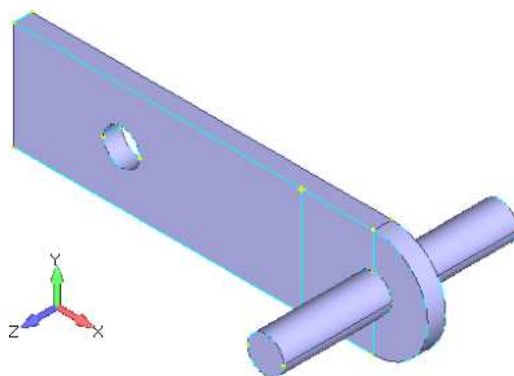


W oknie **Select First Point for Face Split** wskaż pierwszy wprowadzony punkt – kliknij **OK**.
W oknie **Select Second Point for Face Split** wskaż drugi wprowadzony punkt – kliknij **OK**.
W oknie **Select Surface to Split** wskaż płaszczyznę do przecięcia (jak na rys. 1.28). Kliknij **OK**.



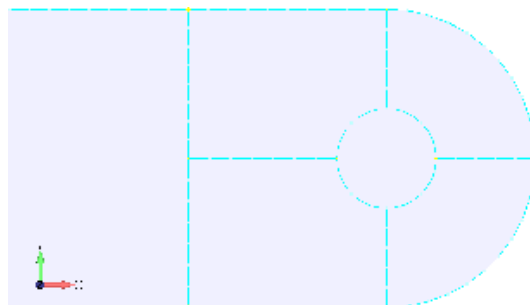
Rys. 1.28. Narzędzie wyboru powierzchni

Geometria powinna wyglądać jak na rys. 1.29.



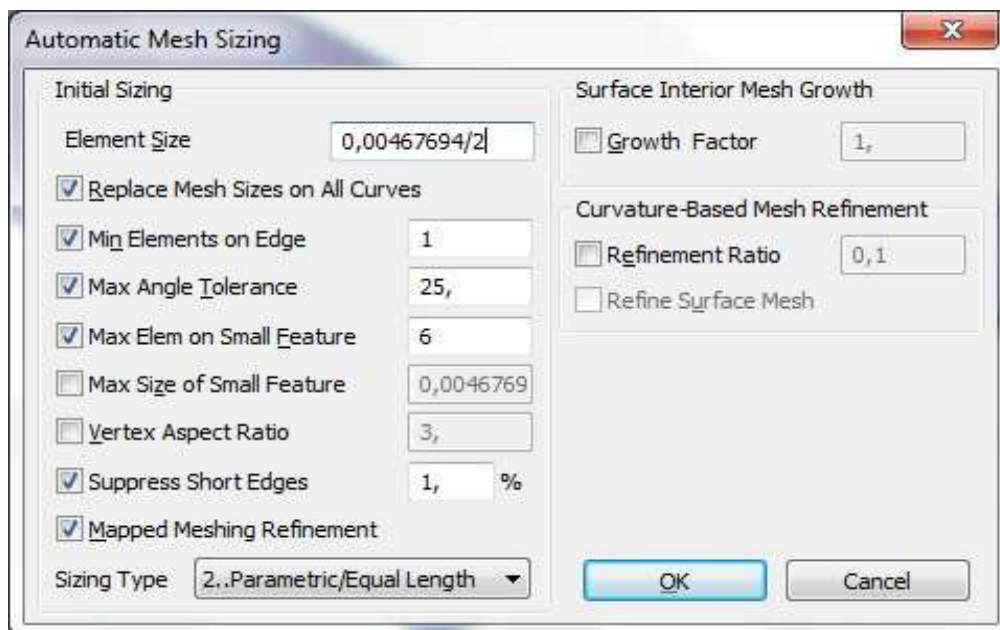
Rys. 1.29. Widok modelu po operacjach

Podziel powierzchnie przy walcu. Dodaj krzywą od walca do środka łuku i od walca do pionowej krzywej, jak na rys. 1.30.



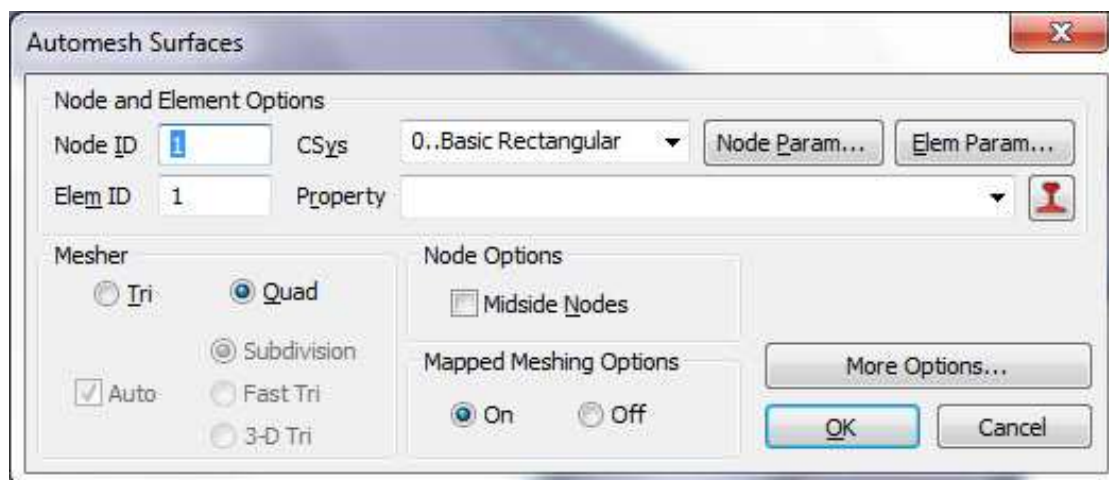
Rys. 1.30. Widok modelu po operacjach

Na pasku **Mesh** wybierz **Mesh Size on Surface**. W oknie **Entity Selection – Select Surface(s) to Set Mesh Size** kliknij **Select All** i **OK**. W oknie **Automatic Mesh Sizing** w polu **Element Size** podziel aktualną wartość przez 2. Kliknij **OK** i **Cancel**.



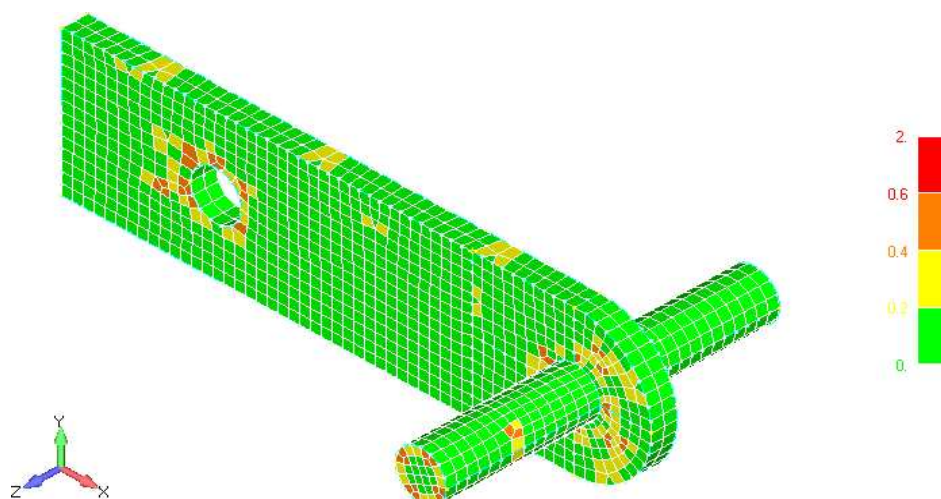
Rys. 1.31. Narzędzie definicji wielkości siatki

Na pasku **Mesh** wybierz **Mesh Surface**. W oknie **Entity Selection – Select Surface(s) to Mesh** kliknij **Select All** i **OK**. W oknie **Automesh Surface** w polu **Mesher** zaznacz opcję **Quad**, kliknij **OK**.



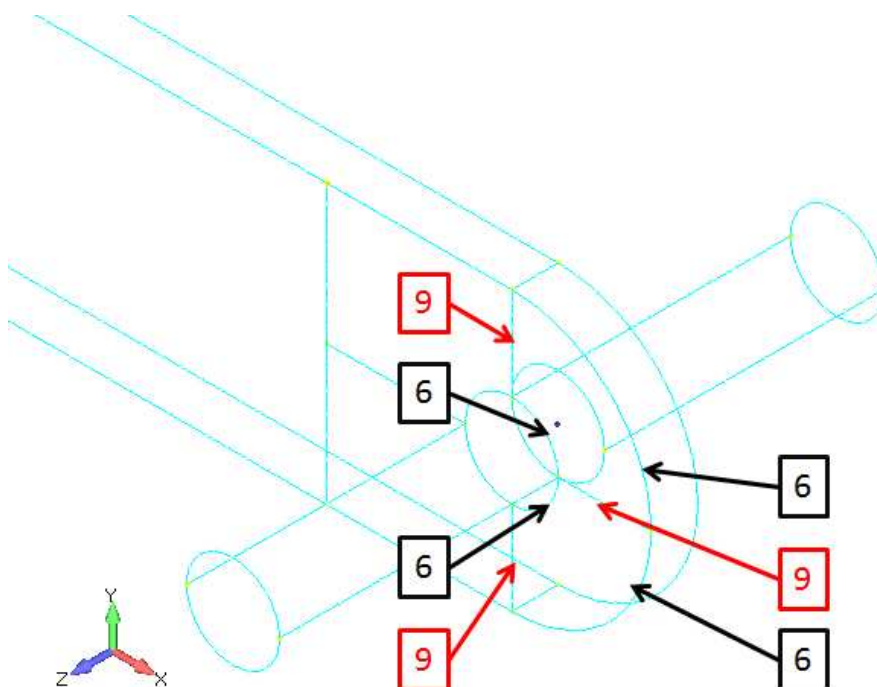
Rys. 1.32. Narzędzie wyboru typu elementu

Na pytanie **OK to mesh with Plot-Only Elements?** kliknij **Yes**. Program utworzy elementy płaskie bez właściwości geometrycznych – do późniejszego utworzenia elementów objętościowych. Wyświetl jakość siatki MES (rys. 1.33).



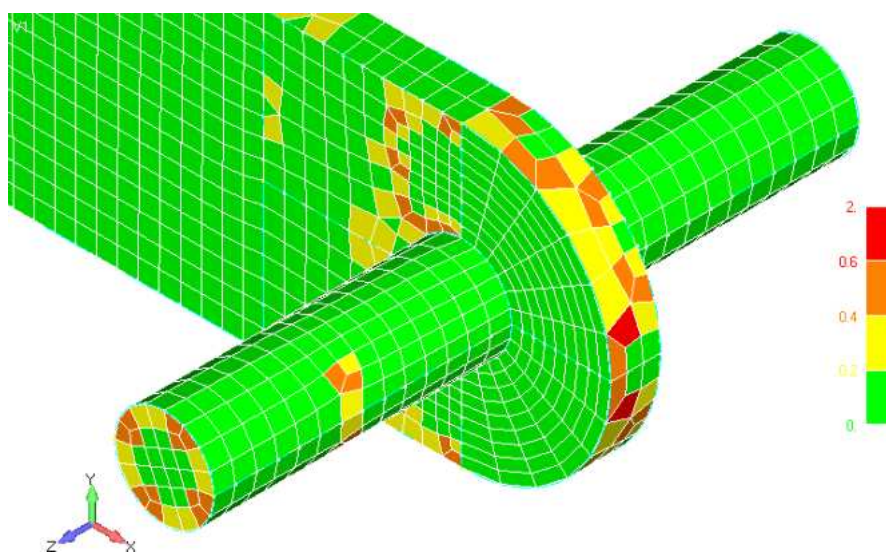
Rys. 1.33. Widok jakości siatki dla przykładu 2

Ustaw liczbę elementów na krzywych (rys. 1.34).



Rys. 1.34. Ustawienie liczby elementów dla poszczególnych części

Efekt zmian (rys. 1.35).



Rys. 1.35. Widok modelu po zmianach



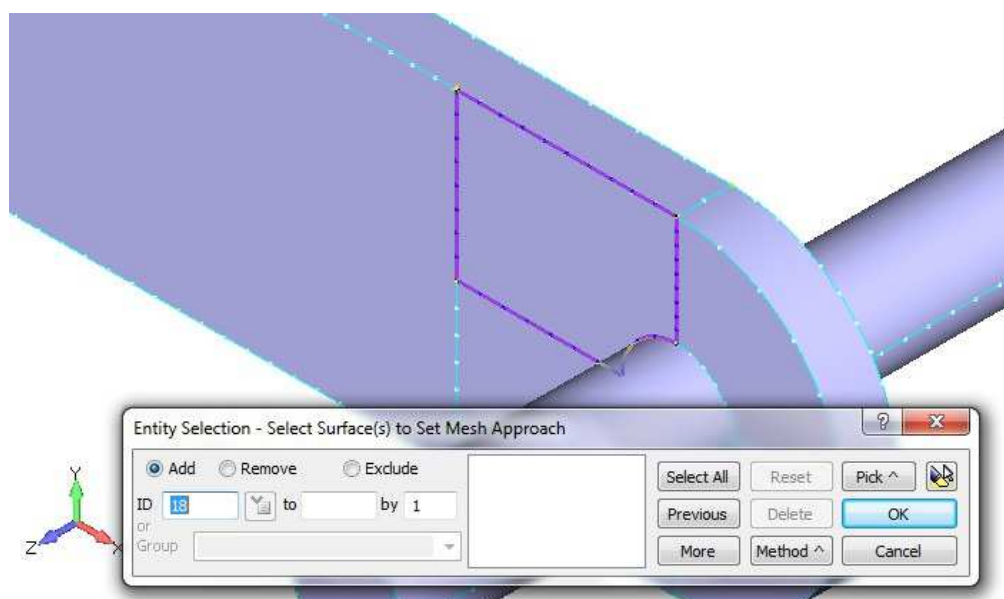
Zapisz zmiany.

1.11. Odwzorowanie (mapowanie) czworościanu

Dla czworobocznej powierzchni, ustalając taką samą liczbę elementów na przeciwległych ścianach, uzyskujemy efekt jak powyżej – siatkę strukturalną MES z elementami czworobocznymi *QUAD* o wysokiej jakości. W przypadku gdy na powierzchni jest nieparzysta liczba krawędzi, wówczas dwie sąsiednie tworzą jedną ścianę i łączna liczba elementów skończonych na nich musi być równa liczbie elementów skończonych na ścianie przeciwległej. Tylko wtedy możliwe jest utworzenie siatki strukturalnej. Powyżej ten proces przeprowadzono ręcznie. Teraz zostanie wykorzystane narzędzie automatyczne.

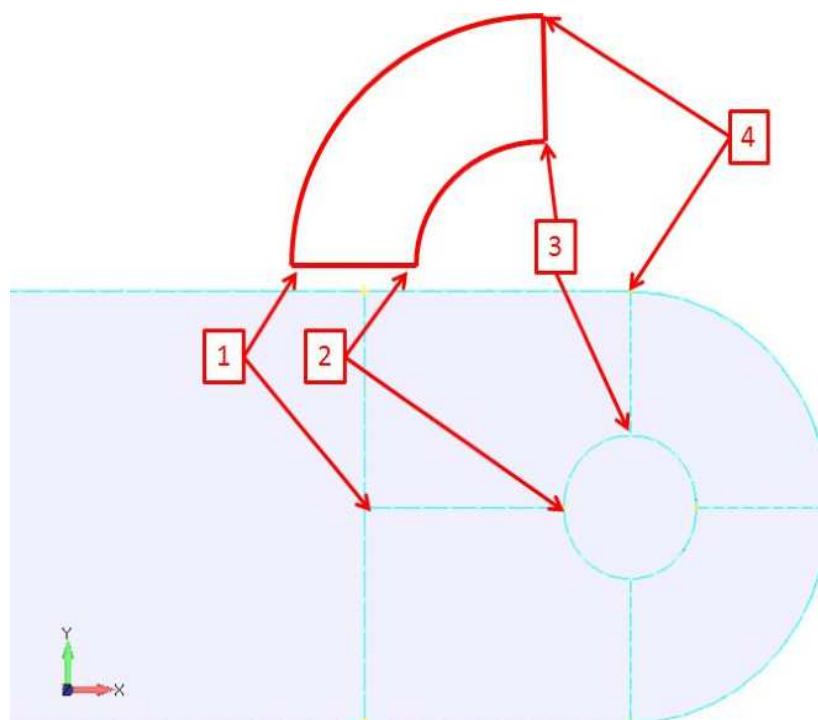
Usuń istniejącą siatkę MES (rozkład elementów na krzywych zostanie zachowany), wybierając z menu głównego **Delete, Model, Mesh....** W oknie **Entity Selection – Select Element(s) to Delete Mesh**, kliknij **Select All, OK**.

Z menu głównego wybierz **Mesh, Mesh Control, Approach On Surface....** Przy otwartym oknie **Entity Selection – Select Surface(s) to Set Mesh Approach** wskaż na ekranie powierzchnię jak na rys. 1.36. Kliknij **OK**.

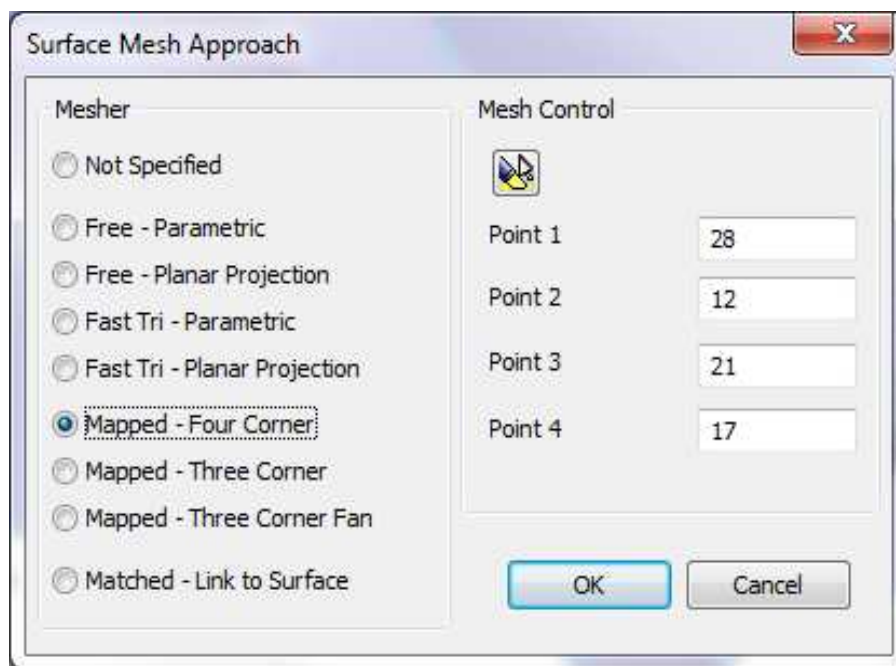


Rys. 1.36. Narzędzie podziału geometrii

W oknie **Surface Mesh Approach** zaznacz opcję **Mapped – Four Corner**. Wybierz cztery narożniki powierzchni, zgodnie z poniższym schematem. Następnie kliknij **OK** i **Cancel**.

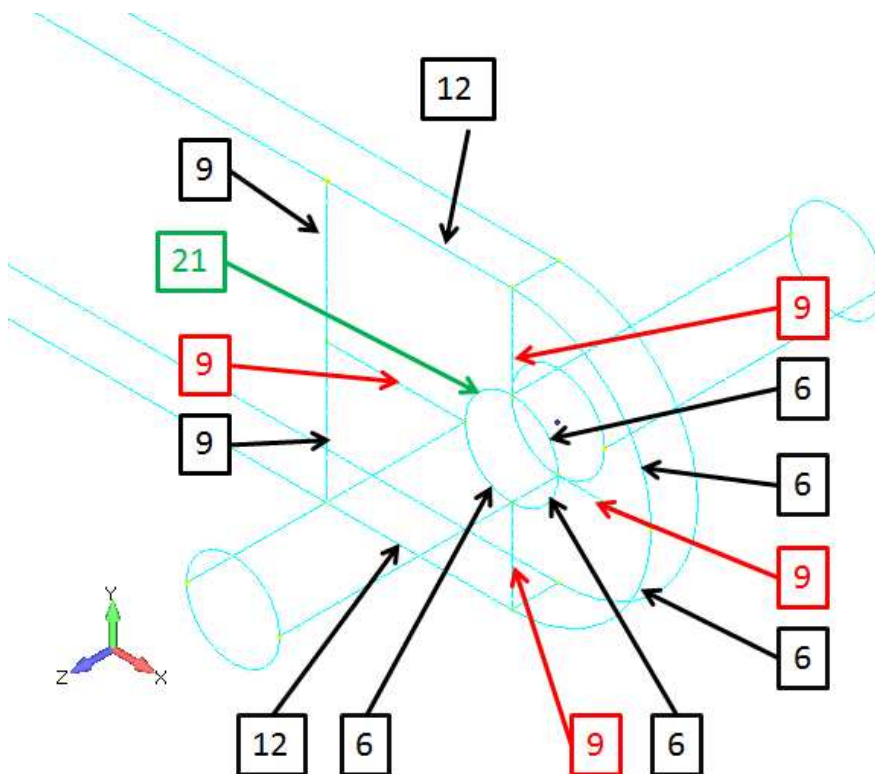


Rys. 1.37. Narzędzie podziału geometrii



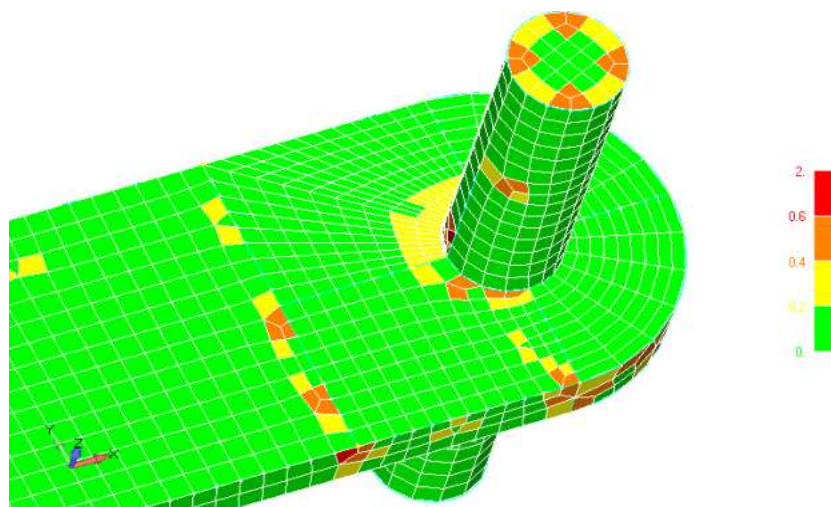
Rys. 1.38. Narzędzie mapowania siatki

Następnie wybierz z paska **Mesh**, **Mesh Surface** i utwórz siatkę powierzchniową na całej geometrii. Ustaw liczbę elementów na krzywych, jak na poniższym obrazku. Zwróć uwagę, że zmieniając liczbę elementów na jednym z boków mapowanego czworosciana, automatycznie zmienia się liczba na przeciwległym boku. Taka możliwość jest dostępna dzięki zastosowaniu narzędzi **Mesh Sizing**.



Rys. 1.39. Przydział elementów dla poszczególnych części

Efekt zmian (rys. 1.40).

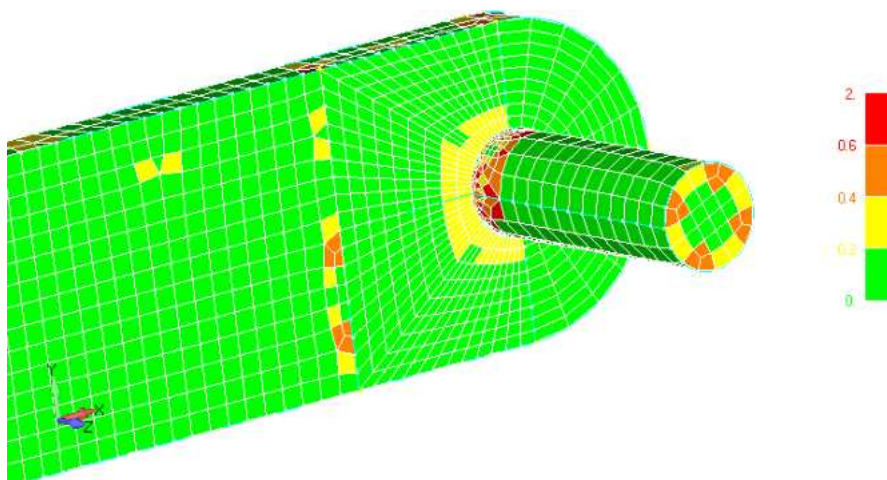


Rys. 1.40. Widok modelu po zmianach



Dolna siatka jest zwykłą siatką z elementami **QUAD**, natomiast górna jest siatką strukturalną.

Usuń siatkę, odwzoruj dolną powierzchnię jako czworościan. Utwórz nową siatkę MES, a następnie zmodyfikuj liczbę elementów na dolnej powierzchni analogicznie jak zostało to przedstawione dla górnej. Efekt zmian przedstawiono na rys. 1.41.



Rys. 1.41. Widok modelu po zmianach



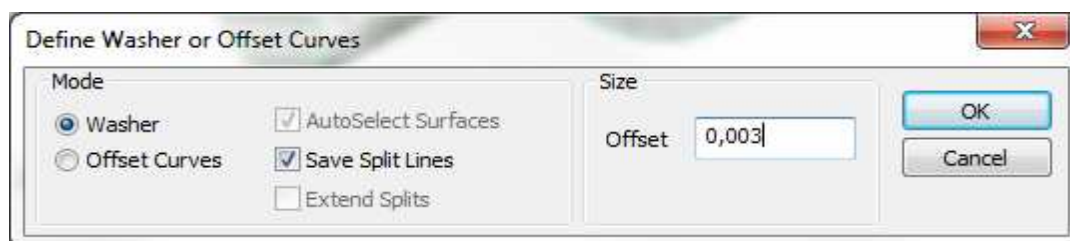
Zapisz zmiany.

1.12. Odsunięcie krawędzi – podkładka

Usuń siatkę MES. Z paska **Curves On Surfaces** wybierz narzędzie **Curve Washer**.

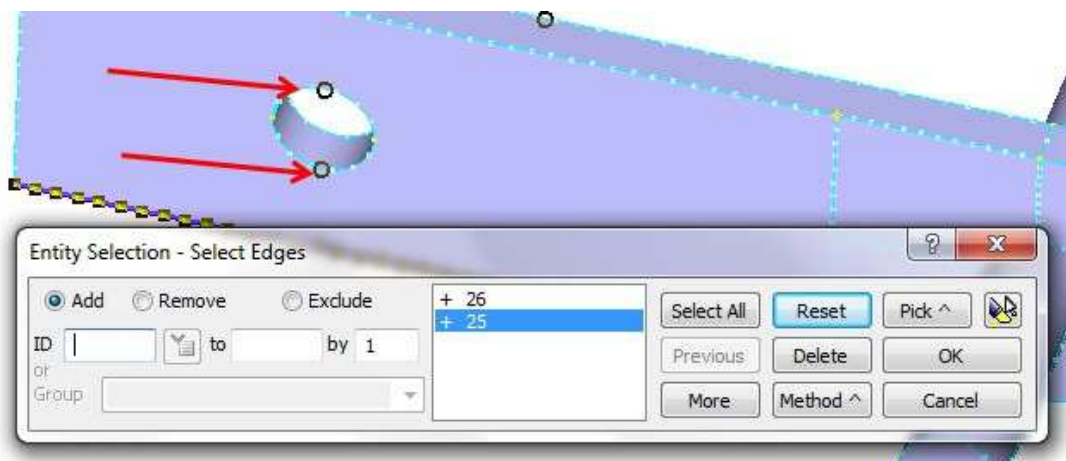


W oknie **Define Washer or Offset Curves**, w polu **Mode** zaznacz opcję *Washer*, a w polu **Size** przy *Offset* wpisz 0,003. Kliknij **OK**.



Rys. 1.42. Narzędzie modyfikacji geometrii

W oknie **Entity Selection – Select Edges** wskaż z ekranu dwie krzywe otworu, kliknij **OK** i dwa razy **Cancel**.



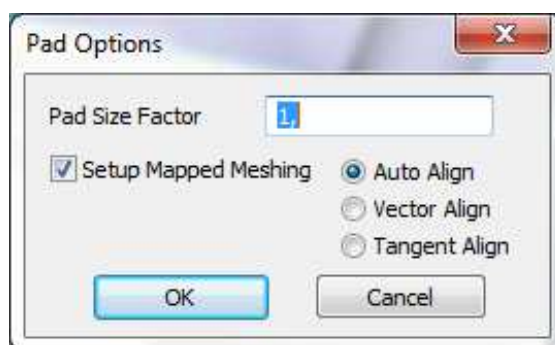
Rys. 1.43. Narzędzie modyfikacji geometrii – wybór geometrii

Ustal taką samą liczbę elementów na krzywych otworu i podkładki – narzędzie **Mesh Sizing** z *Meshing Toolbox*.

Wybierz narzędzie **Curve Pad** z paska **Curves On Surfaces**.

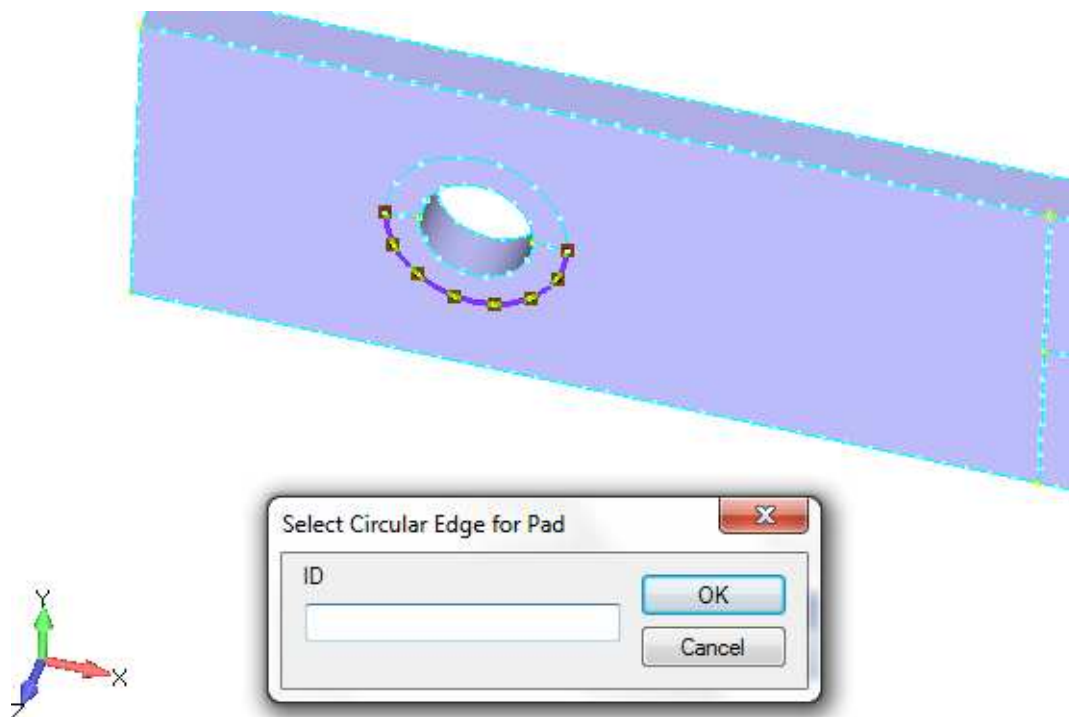


W oknie **Pad Options** w polu **Pad Size Factor** wpisz 1, zaznacz opcje **Setup Mapped Meshing** i **Auto Align**. Program automatycznie odwzorowuje czworoboki na powstałych powierzchniach. Kliknij **OK**.



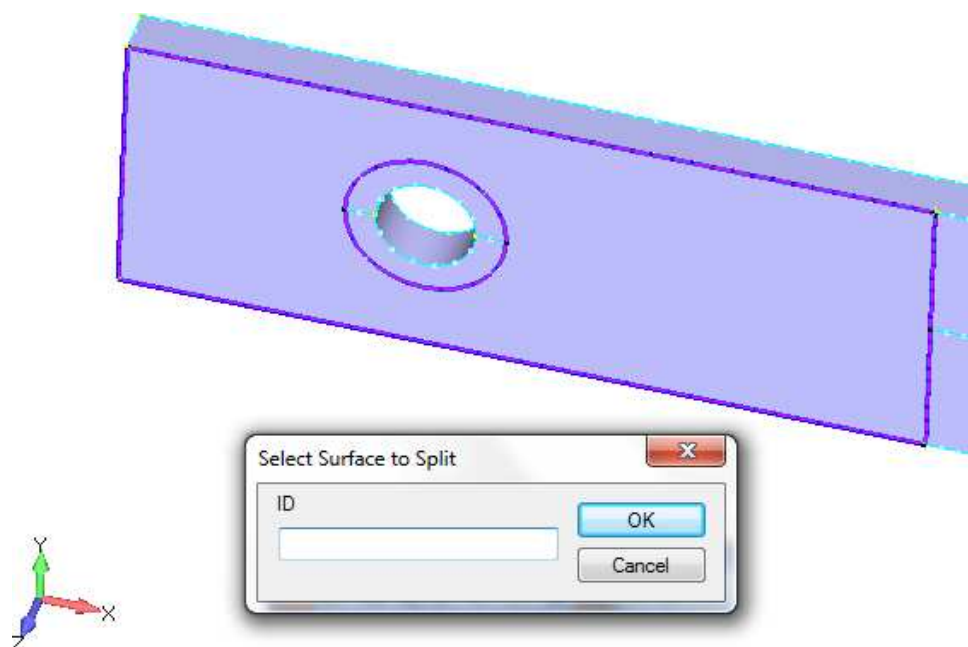
Rys. 1.44. Narzędzie modyfikacji geometrii – wartość odsunięcia

W oknie **Select Circular Edge for Pad** zaznacz na ekranie jedną z krzywych okręgu. Kliknij **OK**.



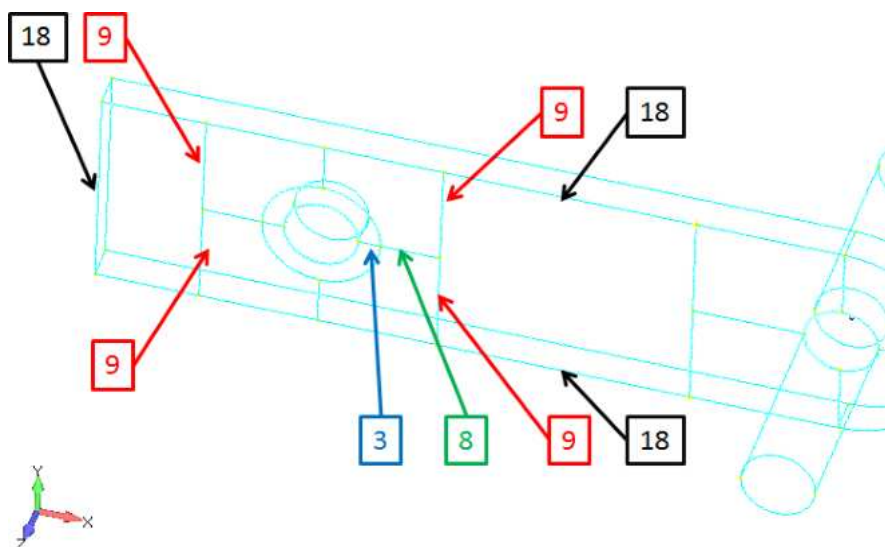
Rys. 1.45. Narzędzie modyfikacji geometrii – wybór krawędzi

W oknie **Select Surface to Split** wskaż na ekranie powierzchnię do podzielenia – w tym przypadku jest to powierzchnia na zewnątrz od zakładki. Kliknij **OK** i **Cancel**.



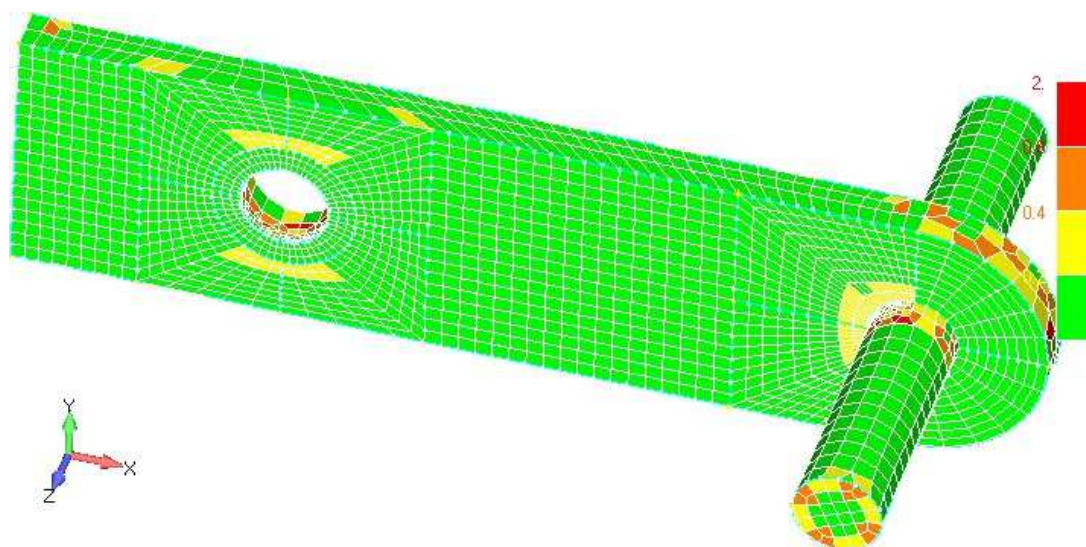
Rys. 1.45a. Narzędzie modyfikacji geometrii – wybór powierzchni

Ustal liczbę elementów jak na poniższym rysunku – narzędzie **Mesh Sizing** z *Meshing Toolbox*.



Rys. 1.46. Przydział elementów dla poszczególnych części

Efekt powyższych zmian (rys. 1.47).



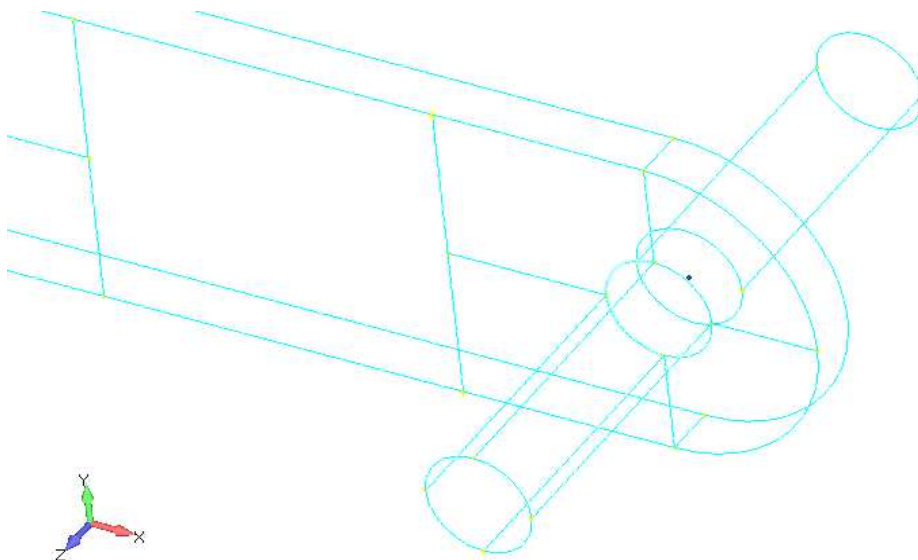
Rys. 1.47. Widok modelu po zmianach



Zapisz zmiany.

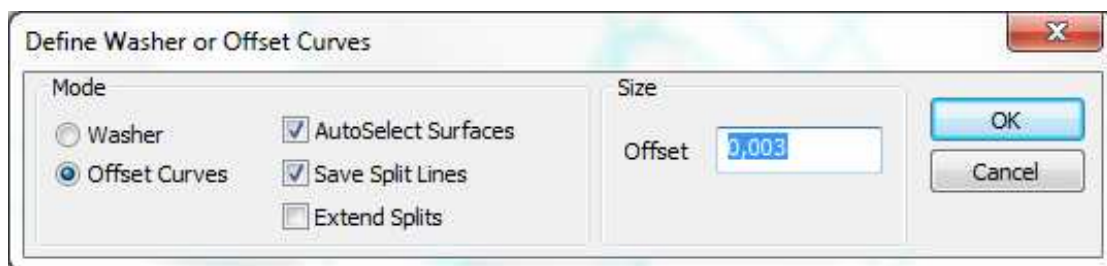
1.13. Interakcyjna zmiana kształtu

Usuń siatkę MES oraz podziel powierzchnie walca jak na rys. 1.48.



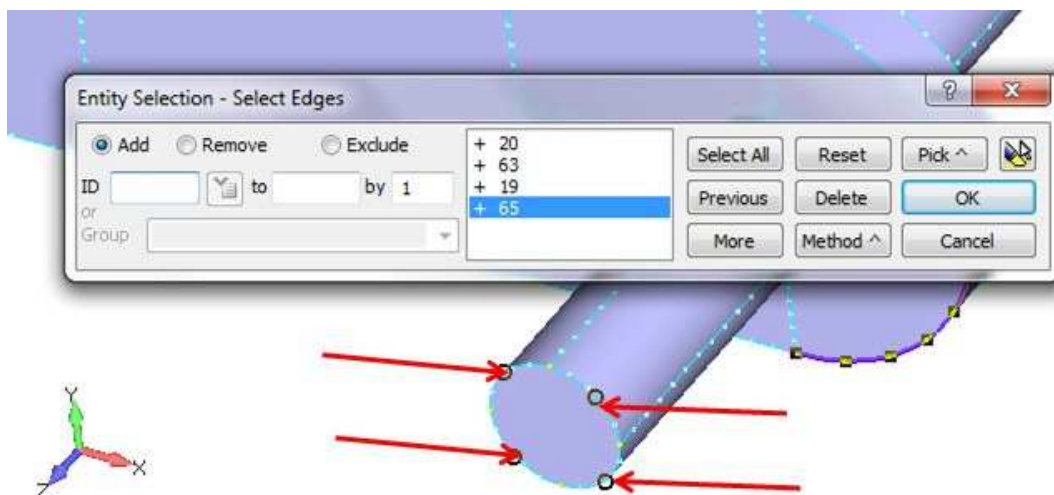
Rys. 1.48. Widok modelu po usunięciu siatki

Wybierz narzędzie tworzenia odsuwania krzywych – **Curve Washer**. W oknie **Define Washer or Offset Curves** w polu **Mode** zaznacz opcję **Offset Curves** – zamiast podkładki zostaną utworzone odsunięte krzywe. W polu **Size** przy **Offset** pozostaw 0,003. Kliknij **OK**.



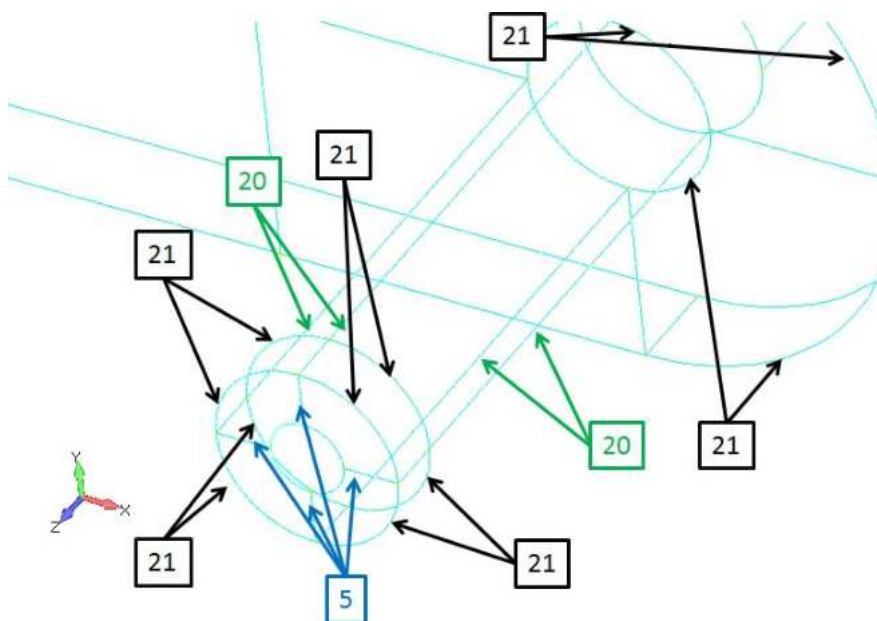
Rys. 1.49. Definicja odsunięcia krawędzi

W oknie **Entity Selection – Select Edges** wskaż na ekranie cztery krzywe walca, jak na rys. 1.50. Kliknij **OK** i dwa razy **Cancel**.



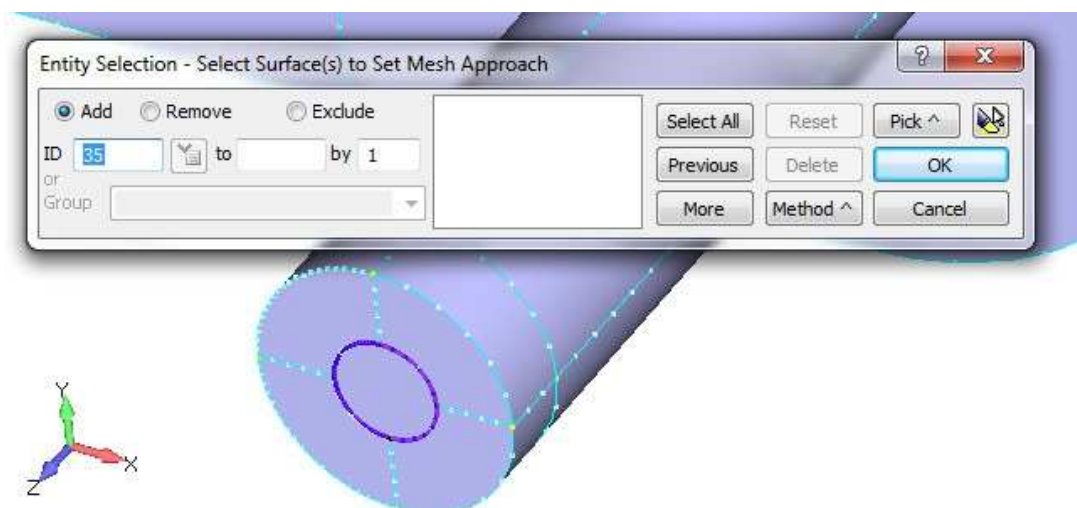
Rys. 1.50. Zaznaczenie krawędzi

Ustal liczbę elementów na krzywych wg rys. 1.51.



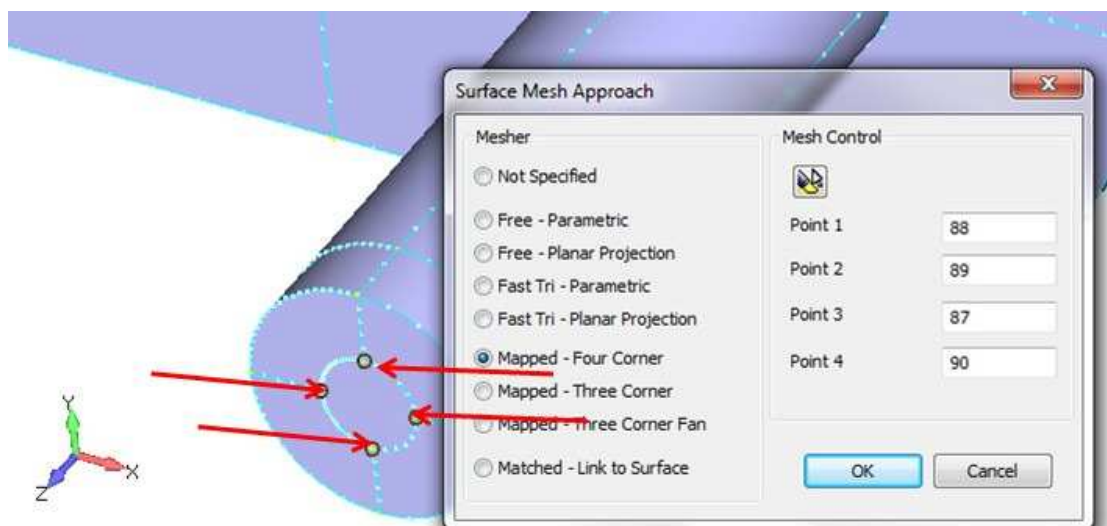
Rys. 1.51. Wskazanie części dla zagęszczenia siatki

Z menu głównego wybierz **Mesh, Mesh Control, Approach On Surface....** Przy otwartym oknie **Entity Selection – Select Surface(s) to Set Mesh Approach** wskaż na ekranie powierzchnię, jak na rys. 1.52. Kliknij **OK**.



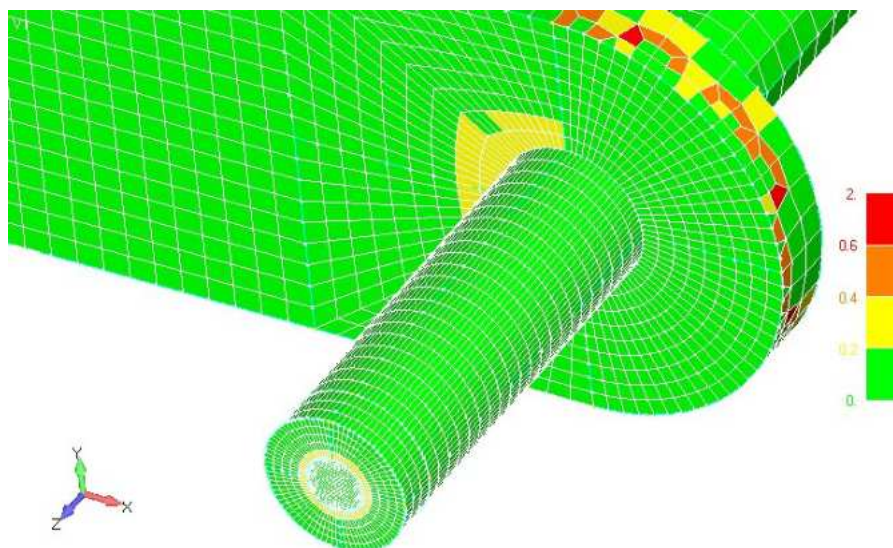
Rys. 1.52. Zaznaczenie krawędzi

W oknie **Surface Mesh Approach** zaznacz opcję **Mapped – Four Corner**. Wybierz cztery narożniki powierzchni. Następnie kliknij **OK** i **Cancel**.



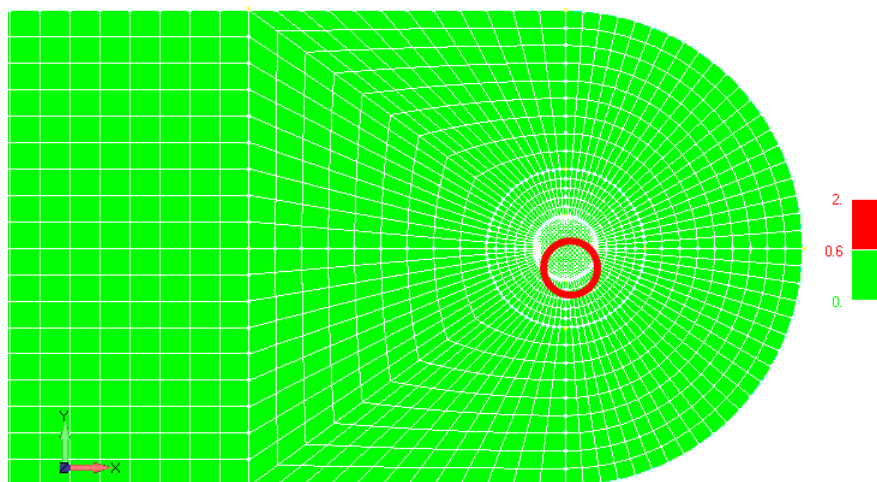
Rys. 1.53. Wskazanie punktów

Efekt zmian (rys. 1.54).



Rys. 1.54. Widok siatki

Na środkowej powierzchni walca (jego czole) znajdują się elementy o bardzo złej jakości (Jakobiany > 0.6). Włącz wyświetlanie dwóch progów jakości. Następnie ustal widok normalny **Top**, wybierając z menu głównego **View** i **Rotate**. Powiększ fragment jak na rys. 1.55.



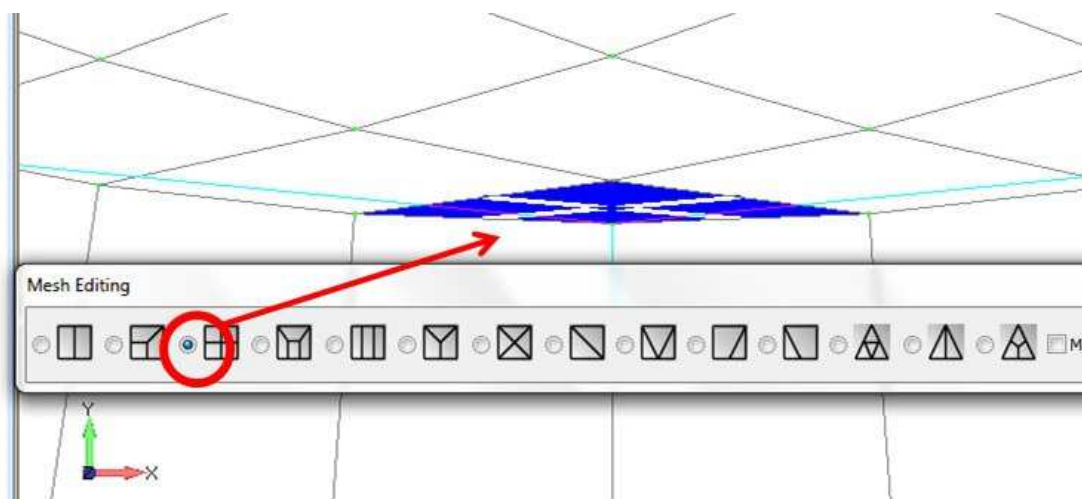
Rys. 1.55. Widok siatki

Z menu głównego wybierz **Mesh, Editing..., Interactive....** Z możliwych opcji podziału elementu wybierz jak na rys. 1.56.



Rys. 1.56. Pasek edycji siatki

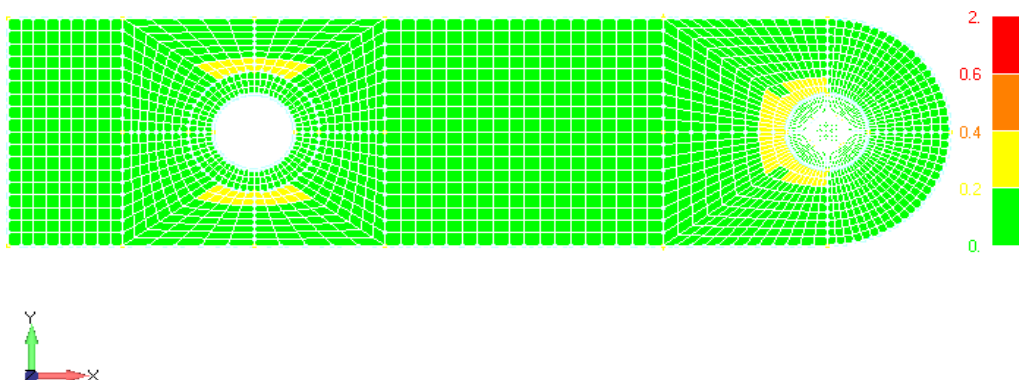
Następnie podziel zdegenerowany element. Kliknij **Done**.



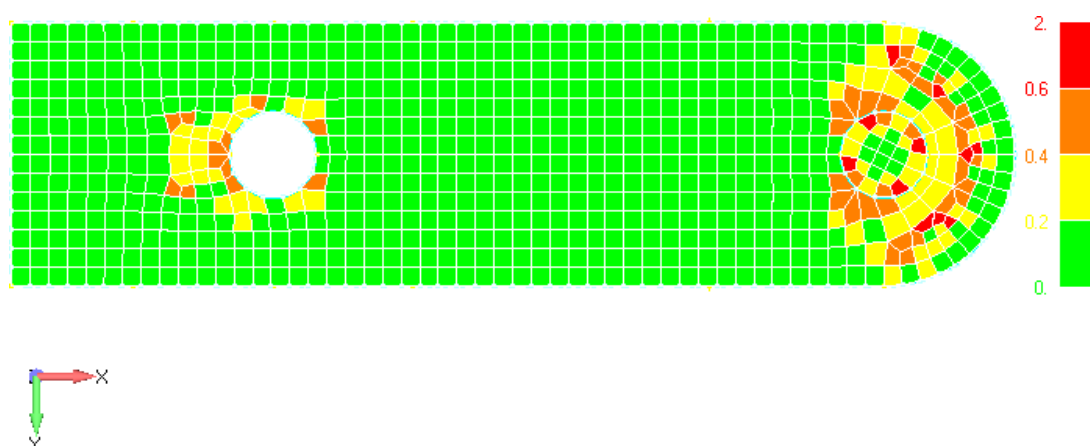
Rys. 1.57. Pasek edycji siatki – wybór elementów

Następnie napraw pozostałe trzy narożniki powierzchni.

Porównaj powierzchniowe siatki MES jednej i drugiej strony modelu CAD.



Rys. 1.58. Widok siatki – strona A



Rys. 1.59. Widok siatki – strona B

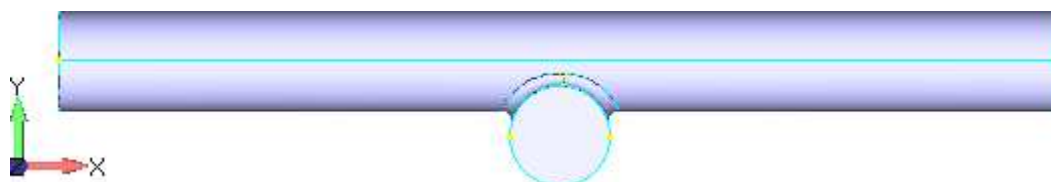
Zwiększając liczbę elementów na krawędziach przy otworze i walcu, można jeszcze bardziej podnieść jakość siatki MES na stronie A.



Zapisz zmiany.

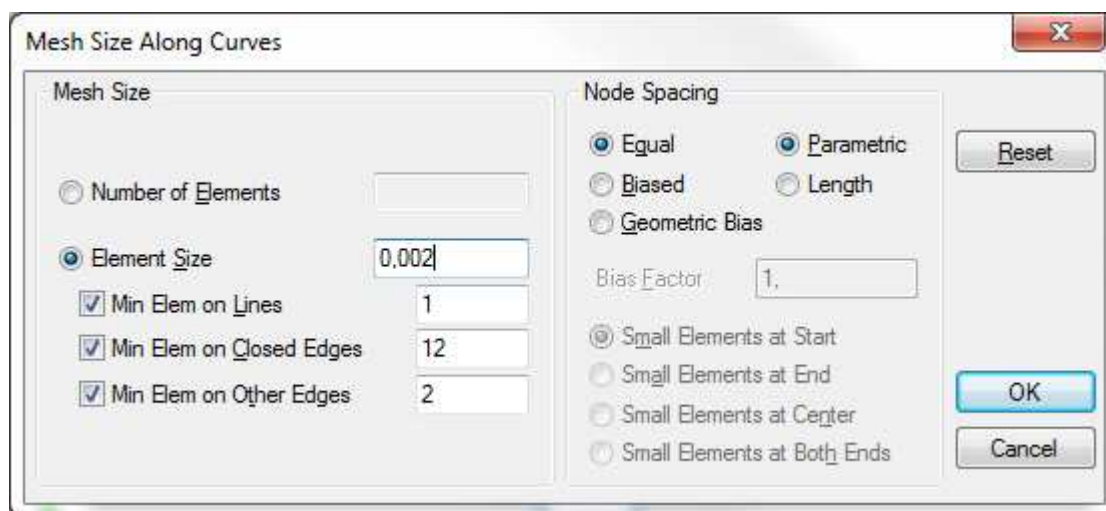
1.14. Generacja siatki objętościowej na podstawie siatki powierzchniowej

Otwórz nowe zadanie **File, New**. Zaimportuj geometrię do przykład nr 3.



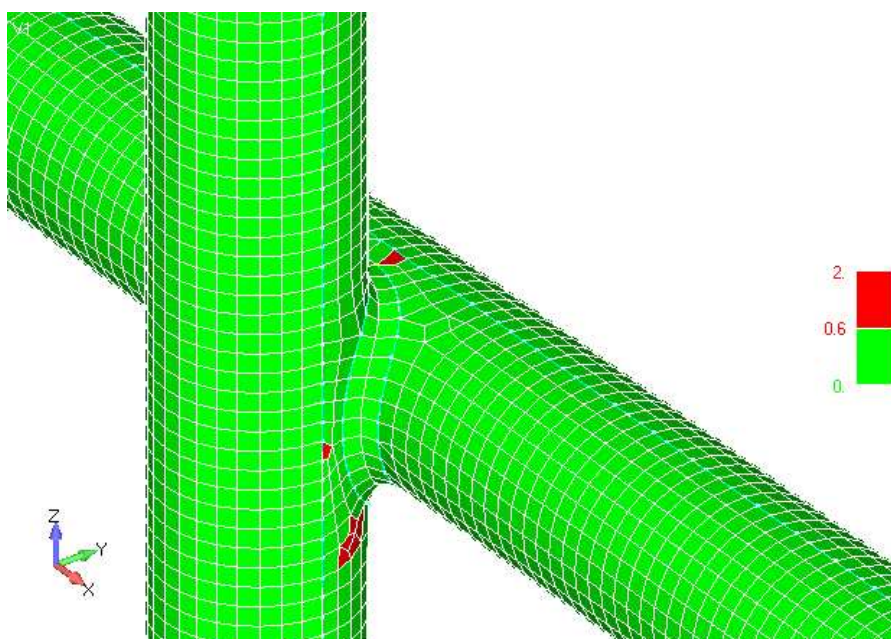
Rys. 1.60. Geometria dla przykładu 3 – widok po imporcie

Na pasku **Mesh** wybierz narzędzie **Mesh Size on Curve**. W oknie **Entity Selection – Select Curve(s) to Set Mesh Size** kliknij **Select All** i **OK**. W oknie **Mesh Size Along Curves** w polu **Mesh Size** zaznacz opcję **Element Size** i wprowadź wielkość $0.002[m]$. Kliknij **OK** i **Cancel**.



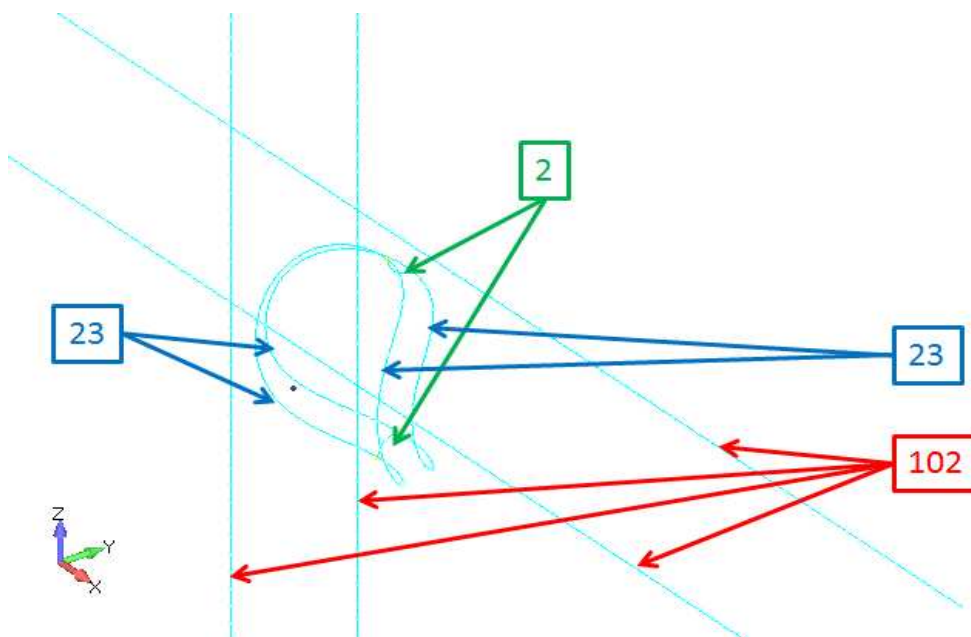
Rys. 1.61. Parametry siatki

Wygeneruj siatkę powierzchniową – **QUAD** oraz wyświetl jej jakość. Jest kilka elementów o złej jakości.



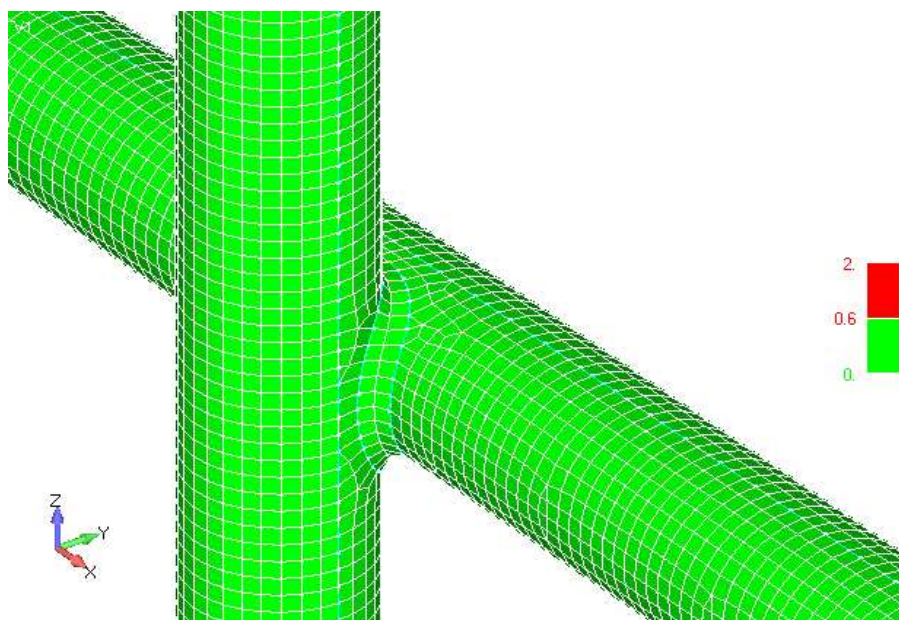
Rys. 1.62. Widok siatki

Ustal liczbę elementów na krzywych jak na rys. 1.63.



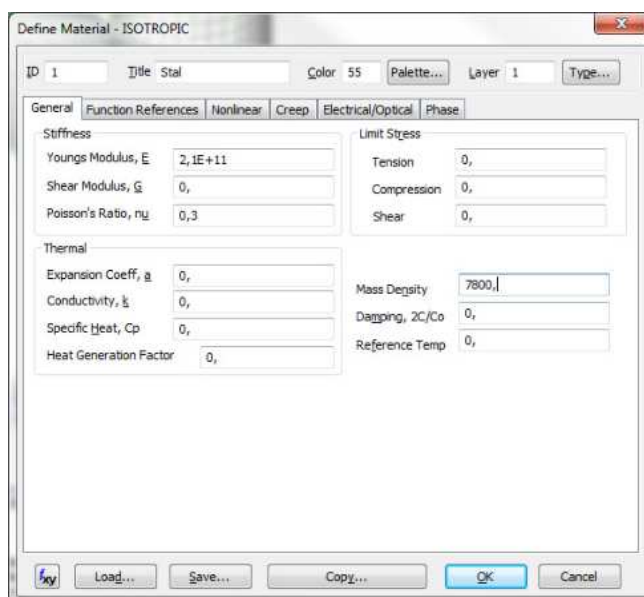
Rys. 1.63. Definicja liczby elementów dla przykładu 3

Efekt zmian (rys. 1.64).



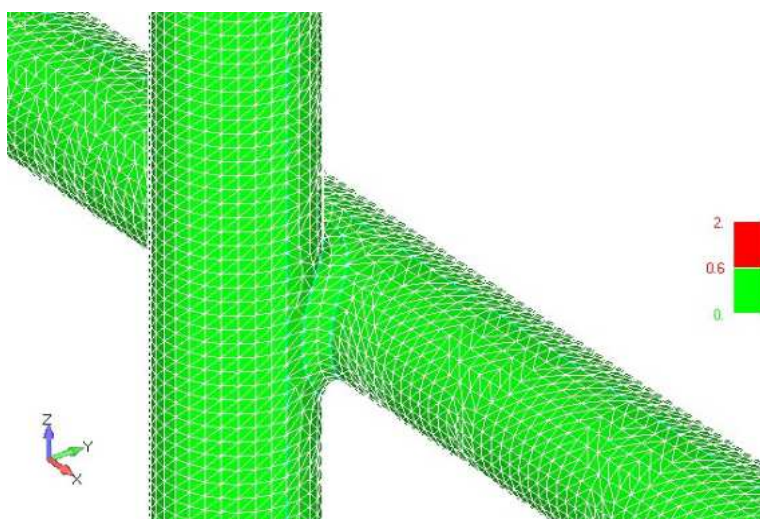
Rys. 1.64. Widok siatki

Wybierz z menu głównego **Mesh, Geometry, Solids from Elements.....** W oknie **Entity Selection – Select Elements to Mesh** kliknij **Select All** i **OK**. W oknie **Define Material – ISOTROPIC** wprowadź wartości materiału. Kliknij **OK**.



Rys. 1.65. Parametry materiału

W oknie **Automesh Solids** w polu **Mesh Generation** odznacz opcję **Midside Nodes** – wygenerowana zostanie siatka składająca się z elementów **TETRA** pierwszego rzędu. Reszta opcji pozostaje bez zmian. Kliknij **OK**. Wygenerowana zostaje siatka objętościowa. Wyświetl jej jakość (rys. 1.66).



Rys. 1.66. Widok siatki

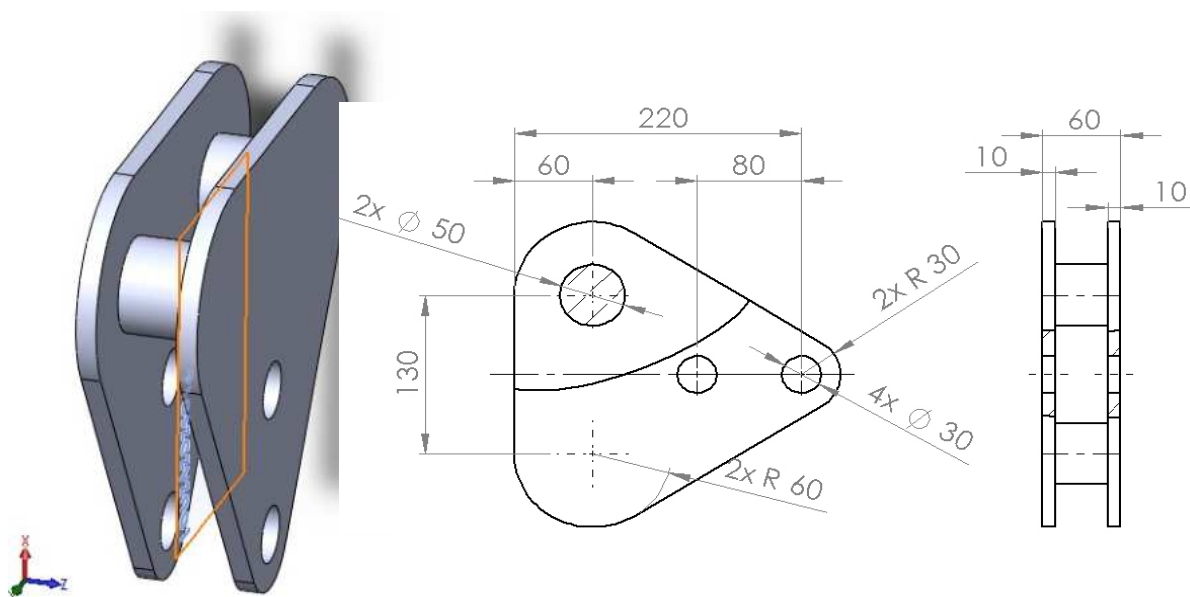
1.15. Przykłady dodatkowe

Zadanie dodatkowe nr 1

Dla przykładu nr 2, zmodyfikuj stronę *B* modelu CAD tak jak to zostało przeprowadzone ze stroną *A*.

Zadanie dodatkowe nr 2

Dla geometrii przedstawionej poniżej, wygeneruj poprawną siatkę powierzchniową, a następnie objętościową MES.



1.16. Podsumowanie

Przedstawiony rozdział poświęcony został istotnemu zagadnieniu związanym z importem geometrii z systemu CAD do oprogramowania MES. Proces ten często związany jest z koniecznością modyfikacji i naprawy geometrii w celu uzyskania poprawnych wyników symulacji. Naprawa geometrii wymaga od użytkownika poznania zaawansowanych narzędzi i operacji. Proces ten pozwala w lepszy sposób zrozumieć istotę problemów, jakie należy rozwiązać, aby uzyskać model dyskretny, który spełni wymagania postawione przez narzędzia obliczeniowe. Informację zawarte w rozdziale zawierają praktyczną wiedzę, która pozwala w sposób efektywny naprawić powstałe błędy oraz dokonać oceny jakości uzyskanego modelu dyskretnego dla symulacji.



Literatura

Domański J., *SolidWorks. Projektowanie maszyn i konstrukcji*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2017.

Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.

Zienkiewicz O. C., *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.

Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., *Metody numeryczne*, WNT, Warszawa 1993.

Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.



Robert Cieślak

Rozdział 2. Projektowanie procesów produkcyjnych w mechanice i budowie maszyn

2.1. Zagadnienia teoretyczne z przykładami

Proces produkcyjny obejmuje wszystkie działania, mające na celu wytworzenie określonych wyrobów w danym zakładzie.

Współczesne zakłady produkujące maszyny są jednostkami złożonymi pod względem gospodarczym i organizacyjnym. Procesy produkcyjne mogą obejmować:

- wytworzenie półfabrykatów,
- obróbkę poszczególnych części,
- kontrolę jakości,
- transport międzyoperacyjny,
- montaż,
- konserwację,
- magazynowanie.

Do procesu produkcyjnego zalicza się także zaopatrzenie stanowisk roboczych w energię, smary, usuwanie odpadów itp. Nie należą natomiast do niego czynności związane z wytwarzaniem energii (nawet wtedy, gdy zakład ma własną siłownię), ogrzewaniem hal, przeróbką odpadów.

Proces produkcyjny w zakładzie budowy maszyn można rozpatrywać w odniesieniu do całego zakładu, tzn. począwszy od wydziałów, gdzie wykonuje się półfabrykaty, tj. odlewni lub kuźni, przez obróbkę mechaniczną i montaż, stanowiska kontroli technicznej, aż do ekspedycji. Wtedy jednak zagadnienie takie staje się bardzo złożone. Najczęściej analizuje się procesy produkcyjne odcinkowo, w odniesieniu do dużych wydziałów, np. odlewni, kuźni, obróbki skrawaniem itp.¹.

Do podstawowych czynności występujących w każdym procesie produkcyjnym należą te czynności, które są bezpośrednio związane ze zmianą kształtu, wymiarów, jakości powierzchni, własności fizyko-chemicznych poszczególnych części, bądź łączeniem ich w zespół (zwany maszyną lub urządzeniem), a które ogólnie nazywamy **procesem technologicznym**. Proces ten ujmuje dwie zasadniczo różniące się fazy produkcji, to jest kształtowanie (produkcję z surowców i materiałów) części maszyn i ich montaż.

Z tych też względów wygodniej jest operować pojęciami bliżej charakteryzującymi te fazy, a mianowicie **procesem technologicznym obróbki i procesem technologicznym montażu**².

Główna komórka organizacyjna zakładu produkującego maszyny, w której przebiega proces technologiczny montażu, zwana najczęściej wydziałem (lub oddziałem) montażowym, jest odbiorcą wszystkich elementów wchodzących w skład wyrobu oraz wytwórcą wyrobu końcowego. Z tych to względów wydział ten w porównaniu z innymi wydziałami zakładu spełnia specjalną rolę, a przede wszystkim rolę koordynacyjną i dyspozytorską. W szczególności wydział montażowy nadaje rytm pracy całemu zakładowi, a m.in. określa wymagania jakościowe wykonania wszystkich części i zespołów, zamyka cykl produkcyjny wyrobów, określa terminy wykonania poszczególnych faz procesu produkcyjnego, kierunki i terminy dostaw materiałów produkcyjnych, części i zespołów. W ten sposób wydział

¹ J. Wodecki, *Podstawy projektowania procesów technologicznych części maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011, s. 9, za: M. Feld, *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000, 2003, s. 17.

² T. Puff, W. Sołtys, *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980, s. 24,



montażowy, a zwłaszcza proces technologiczny montażu spełnia rolę kontroli ostatecznej, pozwalając wykryć nie tylko niedokładności konstrukcyjne i technologiczne poprzedzających faz produkcji, ale również niedokładności organizacyjne³.

Proces technologiczny montażu jest oczywistym etapem procesu produkcyjnego i ma określone znaczenie dla całej produkcji zakładu. Rozpatrując proces technologiczny montażu na tle procesów wykonania części, należy stwierdzić, że żadna z własności uzyskanych poprzednio nie ulega zmianie w procesie montażu. Z drugiej strony nie można uważać procesu technologicznego montażu (co ogólnie powtarza się w spotykanych definicjach montażu lub procesu technologicznego montażu) za zbiór czynności mających na celu wzajemne ustalenie i zamocowanie poszczególnych części, gdyż w takim ujęciu trudno jest dostrzec istotę procesu montażu, o której już poprzednio wspomniano. Potwierdzeniem tego jest znany fakt decydującego wpływu procesu montażu na jakość maszyny, gdyż nieodpowiedni montaż może, mimo dobrze wykonanych części, doprowadzić do szybkiego zużycia maszyny, nie mówiąc już o niewłaściwym jej funkcjonowaniu. Dowodzi to, że proces technologiczny montażu jest jednym z ogniw wszystkich procesów technologicznych (poczynając od metalurgicznego) mających na celu wytworzenie maszyny⁴.

2.2. Rodzaje produkcji

Niezbędnym czynnikiem dla technologa do opracowania procesu technologicznego jest wielkość produkcji na poszczególne lata lub na określoną jednostkę czasu. Do charakterystyki wielkości produkcji przyjmuje się najczęściej 1 rok. Z reguły całkowitą wielkość produkcji rozбивa się na serie produkcyjne i dla nich opracowuje się proces technologiczny. Wielkość serii jest czynnikiem najbardziej wpływającym na opracowanie procesu⁵.

Rozróżnia się pięć rodzajów produkcji: jednostkową, małoseryjną, seryjną, wielkoseryjną i masową.

Ustalenie rodzaju produkcji zależy zarówno od wielkości produkcji, jak i jej charakteru. Orientacyjną wielkość różnych rodzajów produkcji podano w tab. 2.1.

Tab. 2.1. Orientacyjne wielkości różnych rodzajów produkcji

Rodzaj produkcji	Roczny program produkcyjny		
	Wyroby A	Wyroby B	Wyroby C
Jednostkowa	do 5	do 10	do 100
Małoseryjna	5-100	10-200	100-500
Seryjna	100-300	200-500	500-5000
Wielkoseryjna	300-1000	500-5000	5000-50000
Masowa	ponad 1000	ponad 5000	ponad 50000
Oznaczenia: Wyroby A – elementy ciężkie, o dużych gabarytach, znacznej pracochłonności i ciężarze ponad 300[N] Wyroby B – elementy o średnich wymiarach i pracochłonności oraz ciężarze od 80-300[N] Wyroby C – elementy małe, lekkie, o niewielkiej pracochłonności i ciężarze do 80[N]			

Źródło: M. Feld, *Podstawy projektowania*, s. 30, za: J. Łabędź, *Podstawy projektowania*, s. 12.

2.3. Formy organizacyjne produkcji

Forma organizacji produkcji (dotyczy ona zarówno procesu technologicznego obróbki i montażu) określa sposób przepływu materiału między poszczególnymi stanowiskami roboczymi⁶.

³ Tamże, s. 24,

⁴ T. Puff, W. Soltys, *Podstawy technologii*, s. 24.

⁵ M. Feld, *Technologia budowy maszyn*, PWN, Warszawa 1993, s. 26.

⁶ E. Pająk, *Zarządzanie produkcją*, PWN, Warszawa 2006, s. 143.



Zadanie określenia formy organizacyjnej produkcji polega na dobraniu i ustaleniu opłacalnych i korzystnych metod współdziałania elementów procesu wytwórczego (środków technicznych, przedmiotu pracy i siły roboczej), odpowiednich do obiektywnych wymagań procesu (proporcjonalność, równoległość, ciągłość, rytm), ustalonych wg zasad przestrzennej i czasowej struktury procesu technologicznego.

Dobór form organizacyjnych nie może się odbywać w sposób dowolny, lecz powinien przebiegać z uwzględnieniem wymagań ekonomicznych i technicznych.

Wybór form organizacyjnych powinien być dokonywany w oparciu o warianty projektowania tzn. z szeregu możliwych odmian należy na podstawie porównania techniczno-ekonomicznego wybrać optymalną formę organizacyjną produkcji⁷.

Rozmieszczenie urządzeń w elastycznych systemach wytwarzania jest zdeterminowane przez strukturę systemów wytwarzania, którą tworzy sieć powiązań między elementami (podsystemami) systemu, związanych z przepływem strumieni materiałowo-energetycznych i informacyjnych. Z punktu widzenia sposobu rozmieszczenia urządzeń podstawowe znaczenie ma przepływ obrabianych przedmiotów lub nośników przedmiotów, w mniejszym stopniu przepływ pomocy warsztatowych. W każdym systemie przepływu strumieni materiałowych występują funkcje magazynowania, transportu i manipulacji. Urządzenia realizujące te funkcje fizycznie integrują stanowiska technologiczne i inne urządzenia pomocnicze. Powiązania stanowisk wyznaczone przez sposób ich rozmieszczenia tworzą strukturę przestrzenną systemu produkcyjnego. Głównymi czynnikami kształtującymi strukturę przestrzenną systemu produkcyjnego są:

- przebieg procesu wytwarzania (marszruty technologiczne),
- stopień integracji systemu wytwarzania.

Rozróżnia się następujące formy organizacji (struktur) systemów wytwarzania:

- struktury skoncentrowane,
- struktury zwarte (gniazdowe),
- struktury liniowe⁸.

Skoncentrowana forma organizacji produkcji charakteryzuje się tym, że wszystkie operacje niezbędne do pełnej obróbki wyrobu są skoncentrowane na jednym stanowisku pracy. W zależności od typu produkcji stanowisko robocze może realizować obróbkę jednego wyrobu lub wielu często zmieniających się wyrobów w zakresie możliwości technologicznych stanowiska. Według zasady koncentracji pracy można tworzyć całe komórki produkcyjne, w tym także całkowicie zautomatyzowane. Przepływ strumienia materiałów obejmuje:

- dostawę półfabrykatów z magazynu zewnętrznego do stacji obróbkowej,
- magazynowanie półfabrykatów w magazynach buforowych,
- podanie i mocowanie półfabrykatu na stanowisku obróbkowym (obrabiарce, centrum),
- obróbkę przedmiotu,
- zdjęcie obrobionej części ze stanowiska obróbkowego,
- magazynowanie części przy stanowisku,
- transport części do centralnego magazynu, innych stanowisk lub do montażu.

Koncentracja wymienionych funkcji z jednoczesną ich automatyzacją prowadzi do tworzenia autonomicznych stacji obróbkowych, jako formy zintegrowanych systemów wytwarzania⁹.

Gniazdowa forma organizacji jest wynikiem przedmiotowej specjalizacji systemu produkcyjnego. Produkowane wyroby wykazują podobieństwo technologiczne. Asortyment

⁷ T. Puff, W. Sołtys, *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*, s. 272, za: M. Brzeziński, *Organizacja i sterowanie produkcją*, Agencja Wydawnicza „Placet”, Warszawa 2002, s. 98; E. Richter, W. Schilling, M. Weise, *Montaż w budowie maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980, s. 199.

⁸ J. Honczarenko, *Elastyczna automatyzacja wytwarzania, obrabiarki i systemy obróbkowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000, s. 39.

⁹ Tamże, s. 40.



produkowanych w gnieździe wyrobów jest szeroki - może być produkowanych jednocześnie wiele różnych wyrobów. Gniazdowa forma organizacji może mieć postać:

- gniazd technologicznych – w których grupowane są urządzenia technologiczne według swojego przeznaczenia (gniazda tokarek, frezarek, szlifierek itp.),
- gniazd przedmiotowych – w których grupowane są urządzenia pozwalające na wytwarzanie części określonej klasy (gniazdo korpusów, wałków itp.).

W strukturze gniazd technologicznych najczęściej stosowane są następujące rodzaje rozmieszczenia stanowisk roboczych: funkcjonalny oraz modułowy, natomiast w przypadku gniazd przedmiotowych – rozmieszczenie według faz procesu technologicznego i komórkowego.

Liniowa forma organizacji produkcji odpowiada przedmiotowej specjalizacji systemu wytwarzania. Produkowane wyroby wykazują podobieństwo w odniesieniu do wszystkich lub większości operacji technologicznych, a także ich kolejności. W liniowej formie organizacji produkcji powiązania między elementami systemu wytwarzania, a także sposób ich rozmieszczenia, są zgodne z kolejnością wykonywanych operacji technologicznych. Występuje tu jednokierunkowy przepływ strumienia materiałów, który jest realizowany bezpośrednio między kolejnymi stanowiskami. Z funkcjonalnego punktu widzenia można tu mówić o urzeczywistnieniu zasady następstwa operacji. W liniach produkcyjnych jest wykonywana zawsze wielozabiegowa obróbka przedmiotów i najczęściej są stosowane specjalizowane maszyny technologiczne (obrobiarki), chociaż nie jest to regułą. Dla danej partii produkowanych wyrobów takt linii jest stały. Wymaga to przynajmniej częściowej synchronizacji czasów obróbki na poszczególnych stanowiskach, co gwarantuje równomierne ich obciążenie. Czasami obok stanowisk roboczych tworzy się małe magazyny kompensacyjne, wyrównujące chwilowe różnice w wydajności kolejnych stanowisk i pracowników. Linie produkcyjne są budowane jako:

- jednorzędowe z wydzielonymi stacjami załadunku i rozładunku,
- liniowo-kołowe z centralną stacją załadunkowo-rozładunkową,
- segmentowe z magazynami kompensacyjnymi.

Elastyczność linii produkcyjnych wynika przede wszystkim z łatwości jej przebrojenia do wytwarzania różnych partii wyrobów, łatwości programowania przebiegu pracy oraz możliwości rozbudowy linii przy zachowaniu istniejących stanowisk i dróg przepływu materiałów.

W elastycznych liniach produkcyjnych stanowiska robocze są powiązane z podsystemem transportu w różny sposób:

- przedmioty są dostarczane przez podsystem transportu bezpośrednio do przestrzeni roboczej stanowisk z pominięciem elementów pośredniczących,
- przedmioty ze środka transportu trafiają do magazynu buforowego, skąd następnie są pobierane i podawane na stanowisko,
- przedmioty są podawane ze środka transportu do przestrzeni roboczej stanowiska za pomocą urządzenia manipulacyjnego, np. robota przemysłowego, zmieniacza palet¹⁰.

2.4. Projektowanie procesu technologicznego

2.4.1. Obliczenie programu produkcyjnego montażu

Program produkcyjny stanowi całokształt wyrobów możliwych do wyprodukowania w przedsiębiorstwie w określonym przedziale czasu. Jest on opracowywany na podstawie rozeznania rynku, stanu parku maszynowego i wyposażenia przedsiębiorstwa oraz

¹⁰ Honczarenko J., *Elastyczna automatyzacja wytwarzania*, s. 44.



technicznego doświadczenia i kwalifikacji zawodowych personelu. Program produkcyjny jest podstawą do ukształtowania wielkości produkcji, asortymentu oraz profilu.

Niezbędnym czynnikiem dla technologa do opracowania procesu technologicznego jest wielkość produkcji na poszczególne lata lub na określoną jednostkę czasu. Do charakterystyki wielkości produkcji przyjmuje się najczęściej jeden rok. Z reguły całkowitą wielkość produkcji rozбивa się na serie produkcyjne i dla nich opracowuje się proces technologiczny. Wielkość serii jest czynnikiem najbardziej wpływającym na opracowanie procesu¹¹.

2.4.2. Przykładowe wzory

Podstawowe wzory potrzebne do obliczenia programu produkcyjnego montażu.

Program produkcyjny części

$$P_{cz} = \left(\sum_{i=1} P_f \cdot d_i + P_k + P_z \right) \cdot (1 + b_i) \quad [\text{szt/rok}] \quad (2.1)$$

gdzie:

P_f – program wyrobów finalnych [szt/rok]

d – powtarzalność części w wyrobie [szt/wyrób]

P_k – program produkcji części na rzecz kooperacji [szt/rok]

P_z – program produkcji części zamiennych [szt/rok]

b_i – współczynnik produkcji wadliwej [%]

Tempo średnie produkcji

$$P_{sr} = \frac{P_{cz}}{F} \quad (2.2)$$

gdzie:

F – czas pracy

Partia produkcyjna

$$P = P_{sr} \cdot H \quad (4.3)$$

gdzie:

H – Liczba godzin w tygodniu

Takt produkcji (rytm jednostkowy)¹²

$$P_j = \frac{1}{P_{sr}} \quad (2.4)$$

Podstawowe wzory potrzebne do obliczenia programu produkcyjnego obróbki.

Masa elementu

$$m = V \cdot \delta \quad (2.5)$$

gdzie:

δ – gęstość stali,

V – objętość elementu.

¹¹ M. Feld, *Podstawy projektowania*, s. 29, za: M. Feld, *Inżynieria wytwarzania*, s. 70.

¹² B. Kiepuszewski, *Technologia budowy maszyn*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1960, s. 90.



Program produkcyjny

$$P = n \cdot i \cdot \left(1 + \frac{B}{100} + \frac{C}{100} \right) \quad (2.6)$$

gdzie:

- n – liczba sztuk wykonanych,
- i – liczba części na dany wyrób,
- B – braki %,
- C – części zamienne %.

Partia produkcyjna

$$p = \frac{(P \cdot f)}{r} \quad (2.7)$$

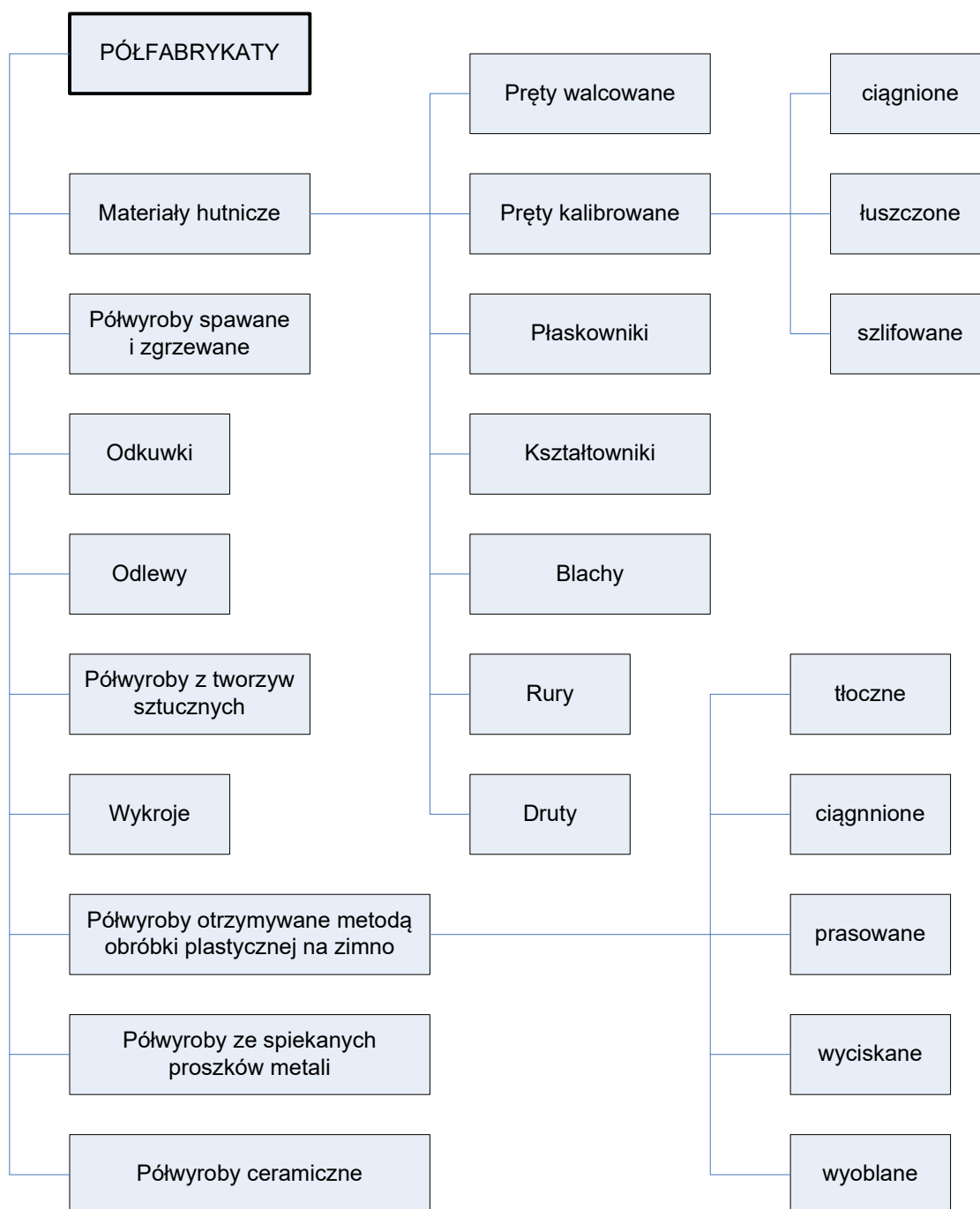
gdzie:

- P – program produkcyjny,
- f – zapas części gotowych do montażu wyrażony w dniach roboczych,
- r – liczba dni roboczych w roku¹³.

2.5. Rodzaje półfabrykatów

W procesach technologicznych stosowane są różne rodzaje półfabrykatów. Najczęściej stosowane w przemyśle półfabrykaty przedstawiono rys. 2.1.

¹³ B. Kiepuszewski, *Technologia budowy maszyn*, s. 90.



Rys. 2.1. Rodzaje półfabrykatów
Źródło: J. Łabędź, *Podstawy projektowania*, s. 37

2.6. Omówienie podstawowego zaplecza technicznego (parku maszynowego)

Proces obróbki jest realizowany w kolejnych operacjach. Dla przeprowadzenia operacji niezbędne są: obrabiarka, narzędzia i obrabiany przedmiot¹⁴.

2.7. Dobór obrabiarki

Na wybór obrabiarki decydujący wpływ ma przedmiot obrabiany, jego przynależność do określonej klasy (wałów, tulei, tarcz, dźwigni, korpusów), wymiary gabarytowe oraz wielkość produkcji i jej powtarzalność.

¹⁴ M. Feld, *Inżynieria wytwarzania*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008, s. 21.



Obrabiarki ogólnie można podzielić na **konwencjonalne i sterowane numerycznie**.

Obrabiarki konwencjonalne (starszego typu) są to obrabiarki sterowane ręcznie, krzywkowo, za pomocą kopiału, wymagające stałej obsługi pracownika.

Do pierwszej grupy tych obrabiarek zalicza się obrabiarki uniwersalne przeznaczone do wykonywania bardzo małej wielkości produkcji.

Drugą, bardzo liczną grupę obrabiarek konwencjonalnych, stanowią obrabiarki produkcyjne. Charakteryzują się one uproszczoną budową w stosunku do obrabiarek uniwersalnych, zwiększoną mocą i są stosowane w produkcji seryjnej i wielkoseryjnej.

Trzecia grupa to obrabiarki specjalizowane. Są to obrabiarki o budowie bardziej złożonej. Zaprojektowanie na nich procesu obróbki wymaga dobrej ich znajomości.

Obrabiarki sterowane numerycznie stanowią nową generację obrabiarek uniwersalnych jak i specjalizowanych. Charakteryzują się one sztywną budową, zapewniającą uzyskanie wyższych dokładności w stosunku do obrabiarek konwencjonalnych. Umożliwiają one prowadzenie obróbki z dużymi prędkościami skrawania¹⁵.

Sterowaniem nazywa się kierowanie pracą maszyn i urządzeń przez wpływanie na parametry i przebieg ich pracy celu zrealizowania zamierzonego działania. Sterowanie odbywa się w układzie otwartym. W teorii regulacji sterowanie w układzie zamkniętym nazywa się **regulacją**.

Układem sterowania (regulacji) nazywa się zespół maszyny czy urządzenia, który w sposób zgodny z zamierzeniem projektanta i użytkownika kieruje (zmienia) jedną lub kilkoma wielkościami fizycznymi, charakterystycznymi dla pracy danego urządzenia.

Sterowanie i regulacja mogą być:

- ręczne, kiedy operator bezpośrednio kieruje pracą maszyny,
- automatyczne, bez bezpośredniego udziału operatora.

Z punktu widzenia automatyzacji pracy obrabiarek układy sterowania (regulacji) realizują elementarne funkcje sterowania, takie jak:

- włączenie i wyłączenie silników napędowych,
- włączenie i wyłączenie ruchów głównych, przestawczych i pomocniczych, a także sterowanie ich przebiegiem (kierunkiem, prędkością),
- nastawianie i kontrolowanie przemieszczeń wykonywanych przez zespoły robocze,
- nastawianie i kontrola dopuszczalnych obciążeń,
- podawanie, mocowanie i wymiana przedmiotów obrabianych, a także narzędzi i oprzyrządowania,
- nadzorowanie przebiegu pracy maszyny.

Cechą charakterystyczną zautomatyzowanych obrabiarek i maszyn technologicznych jest cykliczność pracy, tzn. poszczególne ruchy i czynności odbywają się w ściśle określonej kolejności i powtarzają się dla kolejnych wytwarzanych jednakowo przedmiotów¹⁶.

2.8. Wybór pomocy warsztatowych

Zgodnie z PN-83/M-01250 pomoce warsztatowe to środki technologiczne stosowane przy obróbce, montażu, kontroli lub transporcie stanowiskowym przedmiotów pracy. Są one uzupełnieniem maszyn i urządzeń technologicznych lub służą bezpośrednio pracownikowi przy wykonywaniu pracy.

Do pomocy warsztatowych zalicza się: przyrządy, uchwyty, oprawki, narzędzia do obróbki maszynowej i ręcznej, narzędzia pomiarowe itp. Można je podzielić na dwie grupy:

- **pomoce warsztatowe normalne** (np. klucze, korby, uchwyty narzędziowe, imadła maszynowe, stoły obrotowe, podzielnice, uchwyty samocentrujące, kły, trzpienie

¹⁵ Tamże, s. 21.

¹⁶ J. Honczarenko, *Elastyczna automatyzacja*, s. 149.

tokarskie, uniwersalne narzędzia kontrolno-pomiarowe, narzędzia skrawające znormalizowane itp.);

- **pomoce warsztatowe specjalne** (np. specjalne oprawki wielonarzędziowe, uchwyty i przyrządy przeznaczone do wykonania określonej operacji lub zabiegu na danym przedmiocie, narzędzia i przyrządy kontrolno-pomiarowe, narzędzia skrawające itp.).

Wybór pomocy warsztatowych jest uzależniony między innymi od: rodzaju obrabiarki, typu i wymiarów narzędzia skrawającego, kształtu i wielkości przedmiotu obrabianego, rodzaju wykonywanego zabiegu czy operacji oraz typu produkcji.

Przyjmuje się ogólną zasadę, że:

- w produkcji jednostkowej i małoseryjnej należy stosować pomoce normalne (np. uchwyty narzędziowe i obróbkowe uniwersalne, uchwyty składane z elementów normalnych, narzędzia skrawające znormalizowane itp.);
- w produkcji wielkoseryjnej i masowej stosuje się powszechnie wyposażenie specjalne umożliwiające zwiększenie dokładności obróbki i wydajności pracy;
- w produkcji seryjnej wykorzystuje się obydwa rodzaje pomocy, przy czym udział pomocy specjalnych wzrasta ze zwiększeniem programu produkcyjnego.

Dobierając pomoce warsztatowe dla wykonywanej operacji technologicznej, należy zwrócić szczególną uwagę na wybór narzędzi skrawających. Określając typ i konstrukcję narzędzi stosowanych w procesie technologicznym trzeba uwzględnić: materiał i stan przedmiotu obrabianego (twardość, wytrzymałość na rozciąganie, plastyczność materiału obrabianego), wielkość produkcji, rodzaj i typ obrabiarki, warunki i dokładność obróbki (obróbka zgrubna czy wykańczająca) oraz wymiary i kształt przedmiotu obrabianego. Najistotniejszymi czynnikami decydującymi o poprawności wyboru narzędzia są materiał ostrza i jego geometria, gdyż od tych parametrów zależą właściwości skrawne i pełne jego wykorzystanie w procesie obróbki¹⁷.

2.9. Przykładowy park maszynowy

Poniżej przedstawiono przykładowy park maszynowy.

Frezarskie centrum obróbkowe DMU 50eco	
	- cena zakupu – około 300 000 zł, - zajmowana powierzchnia - 6,0 m², - moc znamionowa silnika - 18,0 kW, - stawka pracownika obsługującego – 30,50 – 40,00 zł/h, - możliwości technologiczne:
	wysokowydajna obrabiarka pozwalająca na zastosowanie koncentracji operacji technologicznych, charakteryzująca się wysoką dokładnością, wykonania części maszyn w porównaniu z frezarkami konwencjonalnymi: operacje frezowania płaszczyzn i rowków, wykonanie otworów i gwintów wewnętrznych

Cena zakupu i stawka pracownika obsługującego obrabiarki są orientacyjne.

¹⁷ J. Łabędź, *Podstawy projektowania*, s. 88.



2.10. Opracowanie dokumentacji technicznej

2.10.1. Strona tytułowa



**AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH
W KONINIE**
WYDZIAŁ NAUK EKONOMICZNYCH
I TECHNICZNYCH
Katedra Nauk Technicznych

Projektowanie procesów montażu

Nazwisko.....

Imię

Wydział/kierunek

Semestr.....Grupa.....

Rok akademicki /

Nr projektu	Data wydania	Data oddania	Ocena	Poprawa	Uwagi	Podpis prowadzącego
1						
2						
3						

Prowadzący zajęcia:

Ocena końcowa Podpis prowadzącego

Wpisano do indeksu dnia

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl

**2.10.2. Analiza technologiczności konstrukcji**

Technologiczność konstrukcji						
Lp.	Cecha	Ocena	Zmiana	Uwagi		
1	Kształty przedmiotu dostosowane do boków stołu obrabiarki (ustalanie)					
2	Ograniczona obróbka zgrubna					
3	Określona baza obróbkowa					
4	Sztywność $l/d \leq 12 \div 15$					
5	Otwory przelotowe					
6	Unikanie karbów ze względu na obróbkę cieplną					
7	Łatwy dobieg i wybieg narzędzi					
8	Stosowanie specjalnego oprzyrządowania i nietypowych narzędzi					
9	Jakość powierzchni zgodna z wymaganiami					
	Opracował:	Podpis:	Data:	Sprawdził:	Data:	Uwagi:

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl



2.10.3. Karta technologiczna montażu

	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		KARTA TECHNOLOGICZNA MONTAŻU		T-4	Cecha wyrobu	Nazwa części	Liczba arkuszy	Nr części
Znak materiału	Postać materiału	Wymiary mater. wyjściowego	Masa materiału wyjściowego (kg)	Wytrzymałość, twardość	Liczba sztuk w wyrobie	Wielkość serii		Arkusz	
								Liczba ark.	
Nr operacji	Treść operacji				Wydział	Stanowisko		Czas, min	
								t _{pz}	t _j
	Uwagi:					Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
					Data				
					Podpis				

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl



2.10.4. Karta instrukcyjna montażu

	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		INSTRUKCJA MONTAŻOWA Nr		T-5		Nazwa zespołu:		Symbol wyrobu:		Liczba arkuszy:		Nr arkusza:	
Dział wykonujący:		Nr operacji:		Nazwa operacji:		Grupa zaszeregowania:		t_{pz}	t_j	$zł t_{pz}$		$zł t_j$	Symbol zespołu:	
Lp.	Opis czynności				Narzędzia			Jednostkowa norma czasu t_w w min		Uwagi:				
					skrawające	pomocnicze	pomiarowe							
									Opracował		Sprawdził		Zatwierdził	
								Data						
								Podpis						

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl

**2.10.5. Schemat montażu zespołu**

	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	SCHEMAT MONTAŻU ZESPOŁU nazwa			T-7	
		Symb. zespołu				Nr operacji	
Treść operacji	Część rysunkowa			Części normalne			
	Il. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Il. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar	
	Opracował		Sprawdził		Zatwierdził		
	Data						
	Podpis						

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl

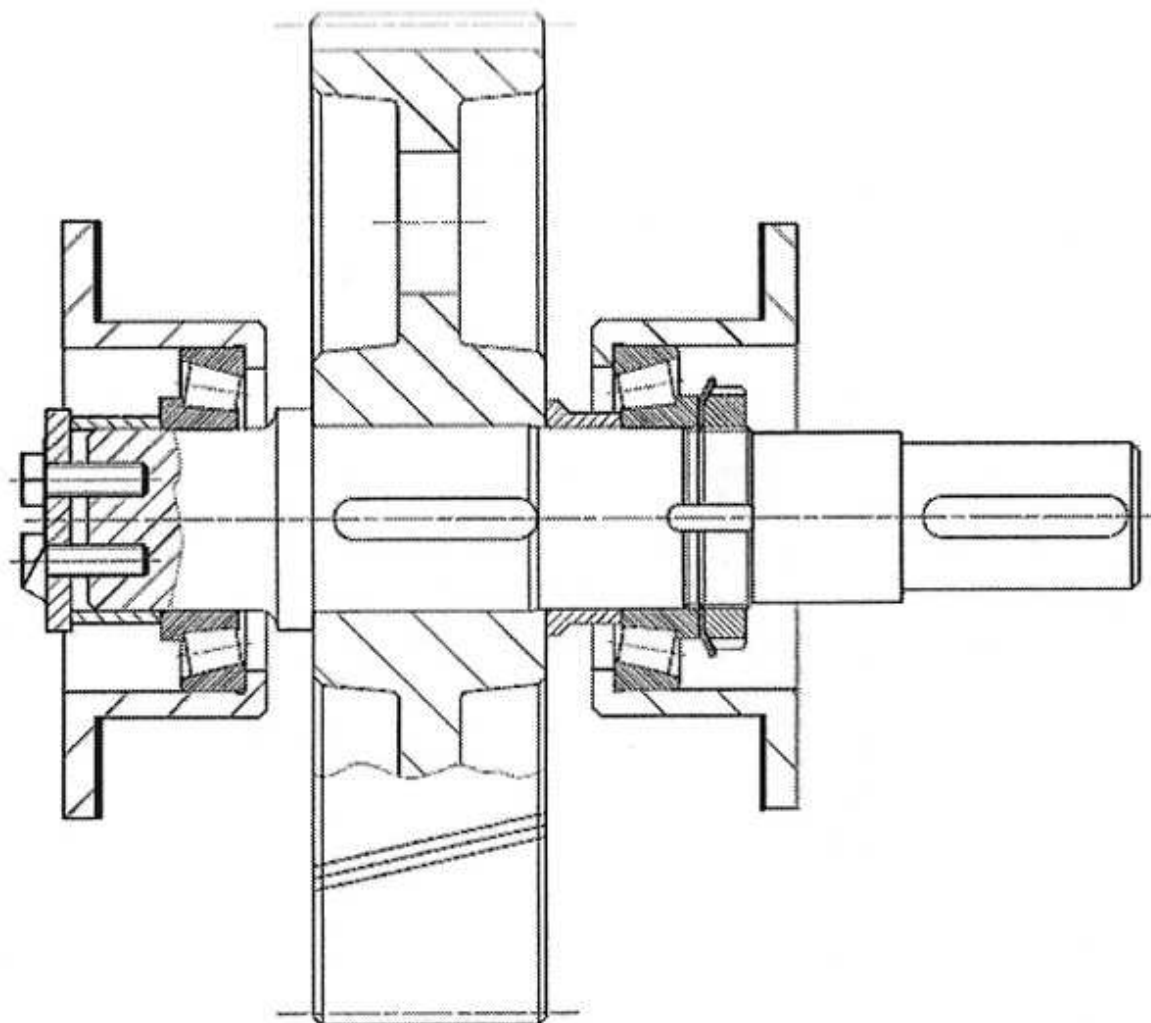
**2.10.6. Rysunek zespołu do montażu**

	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji
	Opracował	Sprawdził		Zatwierdził
Data				
Podpis				

Źródło: Opracowanie własne na podstawie strony internetowej www.dtp.put.poznan.pl



2.11.1. Przykłady wypełnienia dokumentacji technicznej



**Zestawienie części reduktora stożkowo-walcowego**

L.p.	Liczba sztuk	Nazwa części	Numer normy	Material
1	2	Łoż.st. 30207	PN-ISO 355:1997	
2	2	Łoż.st. 30209	PN-ISO 355:1997	
3	1	Krążek 50x20	PN-70/M-85011	
4	1	Krążek 55x20	PN-70/M-85011	
5	1	Podkł.zęb.MB7	PN-82/M-86482	
6	1	Podkł.zęb.MB9	PN-82/M-86482	
7	1	Nakr.łoż.KM7	PN-82/M-86478	
8	1	Nakr.łoż.KM9	PN-82/M-86478	
9	2	Wp.pr.A8x7x50	PN-70/M-85005	
10	2	Wp.pr.A10x8x50	PN-70/M-85005	
11	1	Pier.usz.A32X52X10	PN-72/M-86964	
12	1	Pier.usz.A42X62X10	PN-72/M-86964	
13	2	Koł.st.10x30-B	PN-89/M-85020	
14	2	Podkł. 8,4x20	PN-82/M-82012	
15	8	Podkł.spr. 6,1	PN-77/M-82008	
16	3	Podkł.spr. 8,2	PN-77/M-82008	
17	20	Podkł.spr. 10,2	PN-77/M-82008	
18	8	Podkł.spr. 12,2	PN-77/M-82008	
19	3	Nakr.M8-5-B	PN-86/M-82144	
20	8	Nakr.M12-5-B	PN-86/M-82144	
21	8	Śr.M6x15-5.6-B	PN-85/M-82105	
22	4	Śr.M8x25-5.6-B	PN-85/M-82105	
23	3	Śr.M8x35-5.6-B	PN-85/M-82101	
24	20	Śr.M10x30-5.6-B	PN-85/M-82105	
25	8	Śr.M12x110-5.6-B	PN-85/M-82101	
26	2	Śr.z uch.M10	PN-92/M-82472	
27	1	Uszczelka	03.30.00	pł.suber
28	1	Uszczelka	03.29.00	pł.suber
29	1	Uszczelka	03.28.00	pł.suber
30	1	Uszczelka	03.27.00	pł.suber
31	1	Uszczelka	03.26.00	pł.suber
32	2	Uszczelka	03.25.00	pł.suber
33	2	Uszczelka	03.24.00	pł.suber
34	2	Uszczelka	03.23.00	pł.suber
35	2	Uszczelka	03.22.00	pł.suber
36	1	Oprawa wsk.	03.21.00	150
37	1	Wskaźnik poz.ol.	03.20.00	St3
38	1	Odpowietrzn.	03.19.00	St3
39	1	Korek spust.	03.18.00	St3
40	1	Tuleja	03.17.00	St3
41	1	Tuleja	03.16.00	St3
42	1	Tuleja	03.15.00	St3
43	1	Tuleja	03.14.00	St3
44	2	Tuleja	03.13.00	St3
45	2	Tuleja	03.12.00	200



46	1	Pokrywa	03.11.00	150
47	1	Pokrywa	03.10.00	150
48	1	Pokrywa	03.09.00	150
49	1	Pokrywa	03.08.00	150
50	1	Koło zębate	03.07.00	45
51	1	Koło zębate	03.06.00	50
52	1	Wał	03.05.00	45
53	1	Wał	03.04.00	45
54	1	Pokrywa	03.03.00	200
55	1	Korpus	03.02.00	200
56	1	Pokrywa	03.01.00	200



Przykład wypełnienia kart dla Zespołu wolnobieżnego

Technologiczność konstrukcji						
Lp.	Cecha	Ocena	Zmiana	Uwagi		
1	Kształty przedmiotu dostosowane do boków stołu obrabiarki (ustalanie)	TAK				
2	Ograniczona obróbka zgrubna	TAK				
3	Określona baza obróbkowa	TAK				
4	Sztywność $l/d \leq 12 \div 15$	TAK				
5	Otwory przelotowe	TAK				
6	Unikanie karbów ze względu na obróbkę cieplną	TAK				
7	Łatwy dobieg i wybieg narzędzi	TAK				
8	Stosowanie specjalnego oprzyrządowania i nietypowych narzędzi	NIE				
9	Jakość powierzchni zgodna z wymaganiami	TAK				
	Opracował:	Podpis:	Data:	Sprawdził:	Data:	Uwagi:



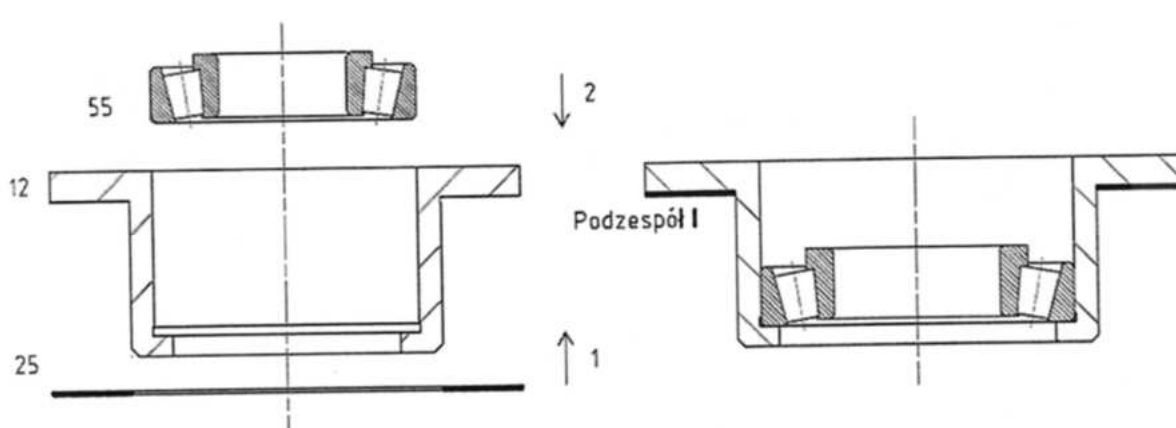
	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		KARTA TECHNOLOGICZNA MONTAŻU		T-4	Cecha wyrobu	Nazwa części	Liczba arkuszy	Nr części
	Znak materiału	Postać materiału	Wymiary mater. wyjściowego	Masa materiału wyjściowego (kg)	Wytrzymałość, twardość	Liczba sztuk w wyrobie	Wielkość serii	Arkusz	
								Liczba ark.	
Nr operacji	Treść operacji				Wydział	Stanowisko	Czas, min		
							t _{pz}	t _j	
10	Montaż podzespołu tulei I wg instrukcji 1				Montaż	Stanowisko montażowe 1	1	2,5	
20	Montaż podzespołu tulei II wg instrukcji 2				Montaż	Stanowisko montażowe 1	1	2,5	
30	Montaż zespołu wału wolnobieżnego I wg instrukcji 3				Montaż	Stanowisko montażowe 1	5	20	
40	Montaż zespołu wału wolnobieżnego I wg instrukcji 4				Montaż	Stanowisko montażowe 1	5	20	
	Uwagi:						Opracował	Sprawdził	Zatwierdził
						Data			
						Podpis			



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		INSTRUKCJA MONTAŻOWA Nr 01		T-5		Nazwa zespołu: Montaż zespołu wału wolnobieżnego		Symbol wyrobu:		Liczba arkuszy: 1		Nr arkusza: 1	
	Dział wykonujący:	Nr operacji:	Nazwa operacji:			Grupa zaszeregowania:		t _{pz}	t _j	zł t _{pz}	zł t _j	Symbol zespołu:		
Montaż		10	Montaż podzespołu tulei					1	2,5					
Lp.	Opis czynności			Narzędzia			Jednostkowa norma czasu t _w w min		Uwagi:					
				skrawające	pomocnicze	pomiarowe								
1	Nałożenie uszczelki poz. 24 na tuleje poz. 13						0,5							
2	Wsunięcie łożyska poz. 55 do tulei poz. 13				Zestaw do montażu łożysk SKF TMFT 36		2							
3	Odłożyć przygotowane części						2							
4	Kontrola jakości													
								Opracował	Sprawdził		Zatwierdził			
							Data							
							Podpis							

AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE	Symb. wyrobu					
	Symb. zespołu					
Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	SCHEMAT MONTAŻU ZESPOŁU nazwa Montaż podzespołu tulei I					
T-7	Nr operacji 10					
	Część rysunkowa	Części normalne				
	Ił. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Ił. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar
Treść operacji	Il. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Il. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar
	1	Tuleja	13	1	Łożysko stożkowe 30209 PN-ISO355:1997	45
	1	Uszczelka 24	16			
Opracował	Sprawdził	Zatwierdził				
Data						
Podpis						



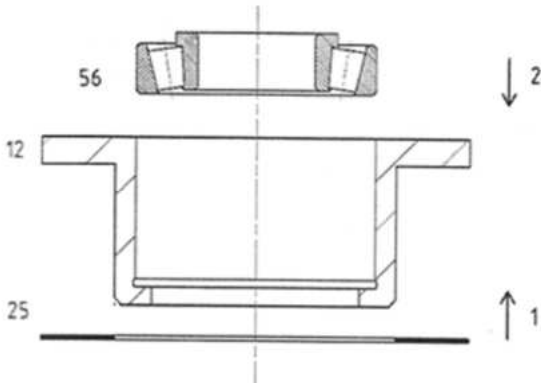
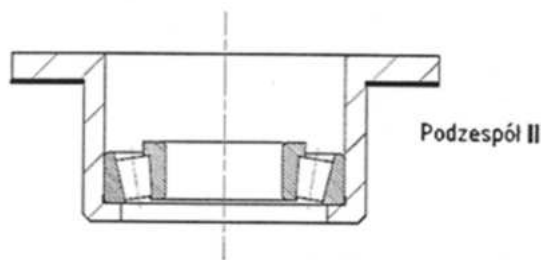
	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż podzespołu tulei I	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji 10
				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		INSTRUKCJA MONTAŻOWA Nr 02		T-5		Nazwa zespołu: Montaż zespołu wału wolnobieżnego		Symbol wyrobu:		Liczba arkuszy: 1		Nr arkusza: 1	
	Dział wykonujący:	Nr operacji:	Nazwa operacji:			Grupa zaszeregowania:		t _{pz}	t _j	zł t _{pz}	zł t _j	Symbol zespołu:		
Montaż		20	Montaż podzespołu tulei II					1	2,5					
Lp.	Opis czynności			Narzędzia			Jednostkowa norma czasu t _w w min		Uwagi:					
				skrawające	pomocnicze	pomiarowe								
1	Nałożenie uszczelki poz. 25 na tuleje poz. 12													
2	Wsunięcie łożyska poz. 56 do tulei poz. 12						Zestaw do montażu łożysk SKF TMFT 36							
3	Odłożyć przygotowane części													
4	Kontrola jakości													
						Opracował		Sprawdził		Zatwierdził				
				Data										
				Podpis										

	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	SCHEMAT MONTAŻU ZESPOŁU nazwa Montaż podzespołu tulei II			T-7								
		Symb. zespołu				Nr operacji 20								
Treść operacji	Część rysunkowa			Części normalne										
	Il. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Il. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar								
	Montaż podzespołu tulei II <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>Tuleja</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Uszczelka</td> <td>25</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>Łożysko stożkowe 30209 PN-ISO355:1997</td> <td>35</td> </tr> </table>						1	Tuleja	12	1	Uszczelka	25	1	Łożysko stożkowe 30209 PN-ISO355:1997
1	Tuleja	12												
1	Uszczelka	25												
1	Łożysko stożkowe 30209 PN-ISO355:1997	35												
	Opracował			Sprawdził		Zatwierdził								
	Data													
	Podpis													



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż podzespołu tulei II	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji 20
  Podzespół II				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				

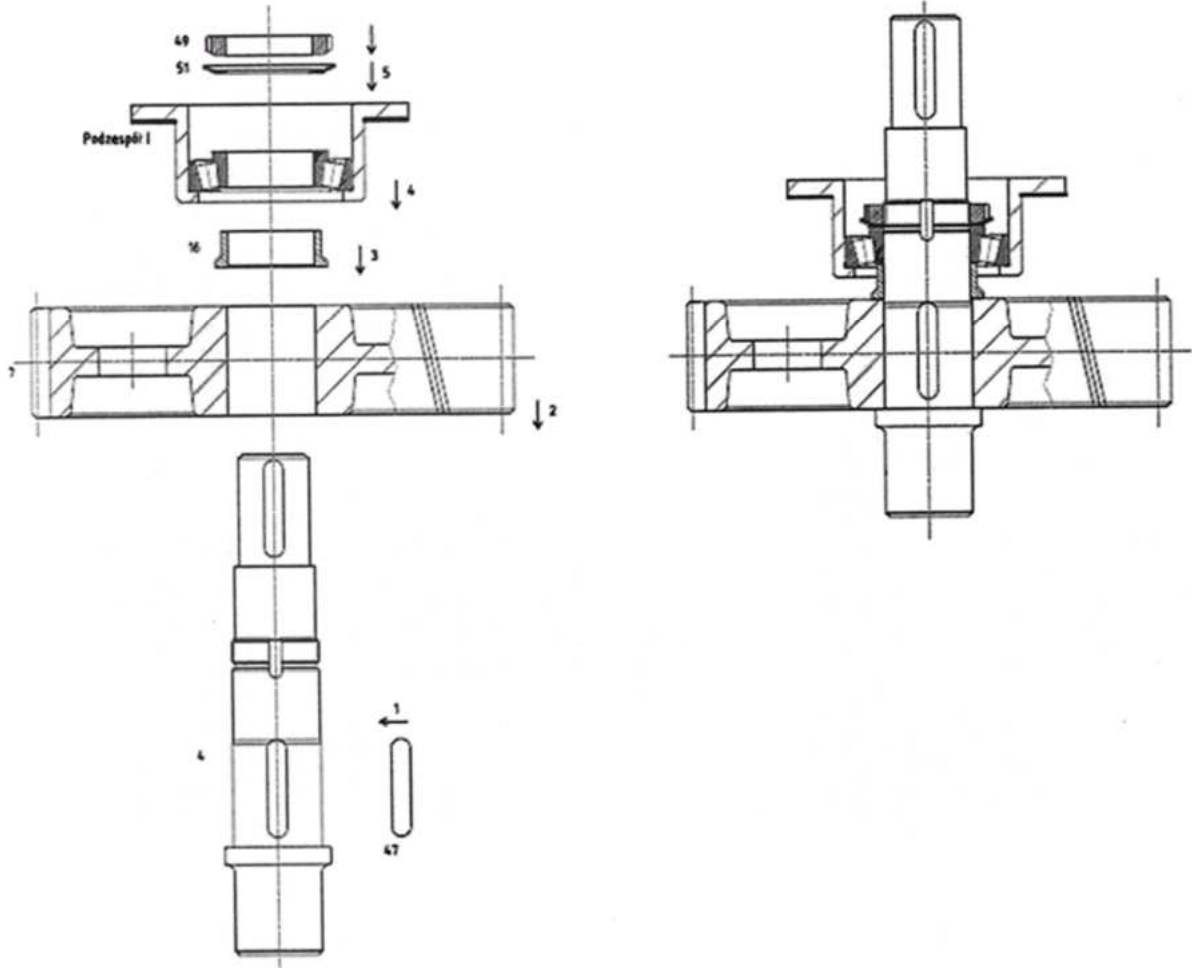


	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		INSTRUKCJA MONTAŻOWA Nr 03		T-5		Nazwa zespołu: Montaż zespołu wału wolnobieżnego		Symbol wyrobu:		Liczba arkuszy: 1		Nr arkusza: 1	
Dział wykonujący:		Nr operacji:		Nazwa operacji:		Grupa zaszeregowania:		t _p	t _j	zł t _p	zł t _j	Symbol zespołu:		
Montaż		30		Montaż zespołu wału wolnobieżnego I				5	20					
Lp.	Opis czynności			Narzędzia			Jednostkowa norma czasu t _w w min		Uwagi:					
				skrawające	pomocnicze	pomiarowe								
1	Założenie wpustu poz. 47 na wał poz. 4								1					
2	Założenie koła zębatego poz. 7 na wał poz. 4								2					
3	Założenie tulei poz. 16 na wał poz. 4								1					
4	Wprasować wcześniej przygotowaną tuleję poz. 13 na wał poz. 4				Zestaw do montażu Łożysk SKF TMFT 36				3					
5	Nasunąć podkładkę zębatą poz. 51 na wał poz. 4 i dokręcić nakrętką łożyskową poz. 49, zagiąć ząb podkładki				Klucz HN 8-9 szczypce				3					
6	Obrócić wałek								1					
7	Wprasować wcześniej przygotowaną tuleję poz. 12 na wał poz. 4				Zestaw do montażu łożysk SKF TMFT 36				3					
8	Założenie tulei poz. 14 na wał poz. 4								1					
9	Założyć krążek poz. 53, podkładkę poz. 43, dokręcić lekko 2 śrubami M8x25 poz. 35				Klucz RWPDg				2					
10	Kontrola jakości								3					
						Opracował		Sprawdził		Zatwierdził				
						Data								
						Podpis								

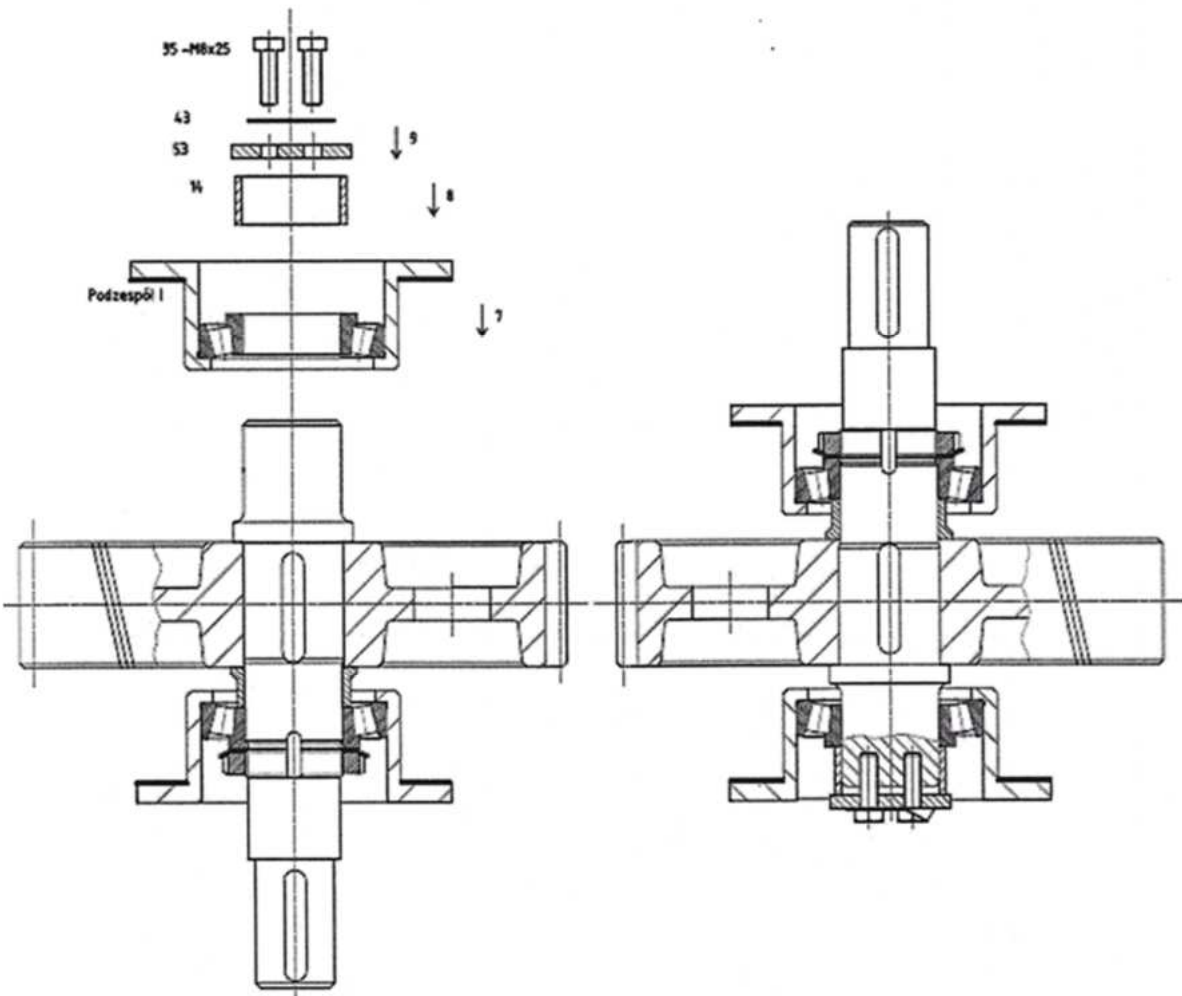


	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	SCHEMAT MONTAŻU ZESPOŁU nazwa Montaż zespołu wału I			T - 7	
		Symb. zespołu				Nr operacji 30	
Treść operacji	Część rysunkowa			Części normalne			
	Il. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Il. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar	
Montaż zespołu wału I	1	Wał	4	1	Wpust pryzmatyczny A 10x8x50 PN-70/M-85005	10	
	1	Koło zębate	6	1	Podkładka zębata MB9 PN-82/M-86482	45	
	1	Tuleja	16	1	Nakrętka łożyskowa KM9 PN-82/M-86478	45	
	1	Podzespół tulei		1	Krażek 55x20 PN-70/M-85011	55	
	1	Tuleja	14	1	Śruba M8x25-5,6-B PN-85/M-82105	M8	
				1	Podkładka 8,4x20 PN-82/M-82012	8,4	
	Opracował		Sprawdził		Zatwierdził		
	Data						
	Podpis						



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU	T - 8
		Symb. zespołu		
				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż zespołu wał I	T - 8
		Symb. zespołu		Nr operacji 30
				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				

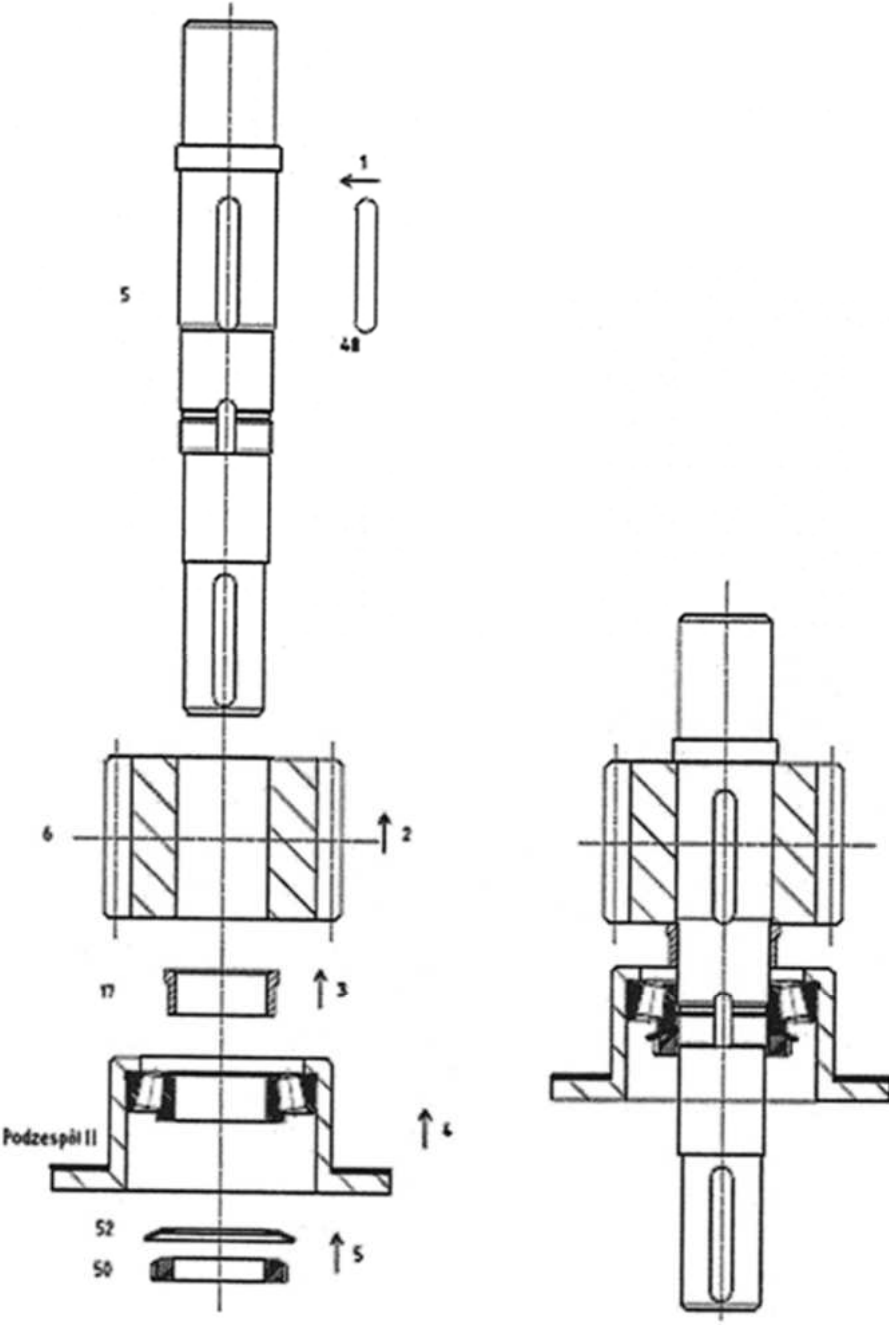


	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych		INSTRUKCJA MONTAŻOWA Nr 04		T- 5		Nazwa zespołu: Montaż zespołu wolnobieżnego		Symbol wyrobu:		Liczba arkuszy: 1		Nr arkusza: 1	
Dział wykonujący:		Nr operacji:		Nazwa operacji:		Grupa zaszeregowania:		t _{pz}	t _j	zł t _{pz}	zł t _j	Symbol zespołu:		
Montaż		40		Montaż zespołu wału wolnobieżnego II				5	20					
Lp.	Opis czynności				Narzędzia			Jednostkowa norma czasu t _w w min		Uwagi:				
					skrawające	pomocnicze	pomiarowe							
1	Założenie wpustu poz. 48 na wał poz. 5									1				
2	Założenie koła zębatego poz. 6 na wał poz. 5									2				
3	Założenie tulei poz. 17 na wał poz. 5									1				
4	Wprasować wcześniej przygotowaną tuleję poz. 12 na wał poz. 5					Zestaw do montażu Łożysk SKF TMFT 36				3				
5	Nasunąć podkładkę zębatą poz. 52 na wał poz. 5 i dokręcić nakrętką łożyskową poz. 50, zagiąć ząb podkładki					Klucz HN 8-9 szczypce				3				
6	Obrócić wałek									1				
7	Wprasować wcześniej przygotowaną tuleję poz. 12 na wał poz. 5					Zestaw do montażu łożysk SKF TMFT 36				3				
8	Założenie tulei poz. 15 na wał poz. 5									1				
9	Założyć krążek poz. 54, podkładkę poz. 43, dokręcić lekko 2 śrubami M8x25 poz. 35									2				
10	Kontrola jakości									3				
						Klucz RWPDg		Sprawdził		Zatwierdził				
					Podpis									

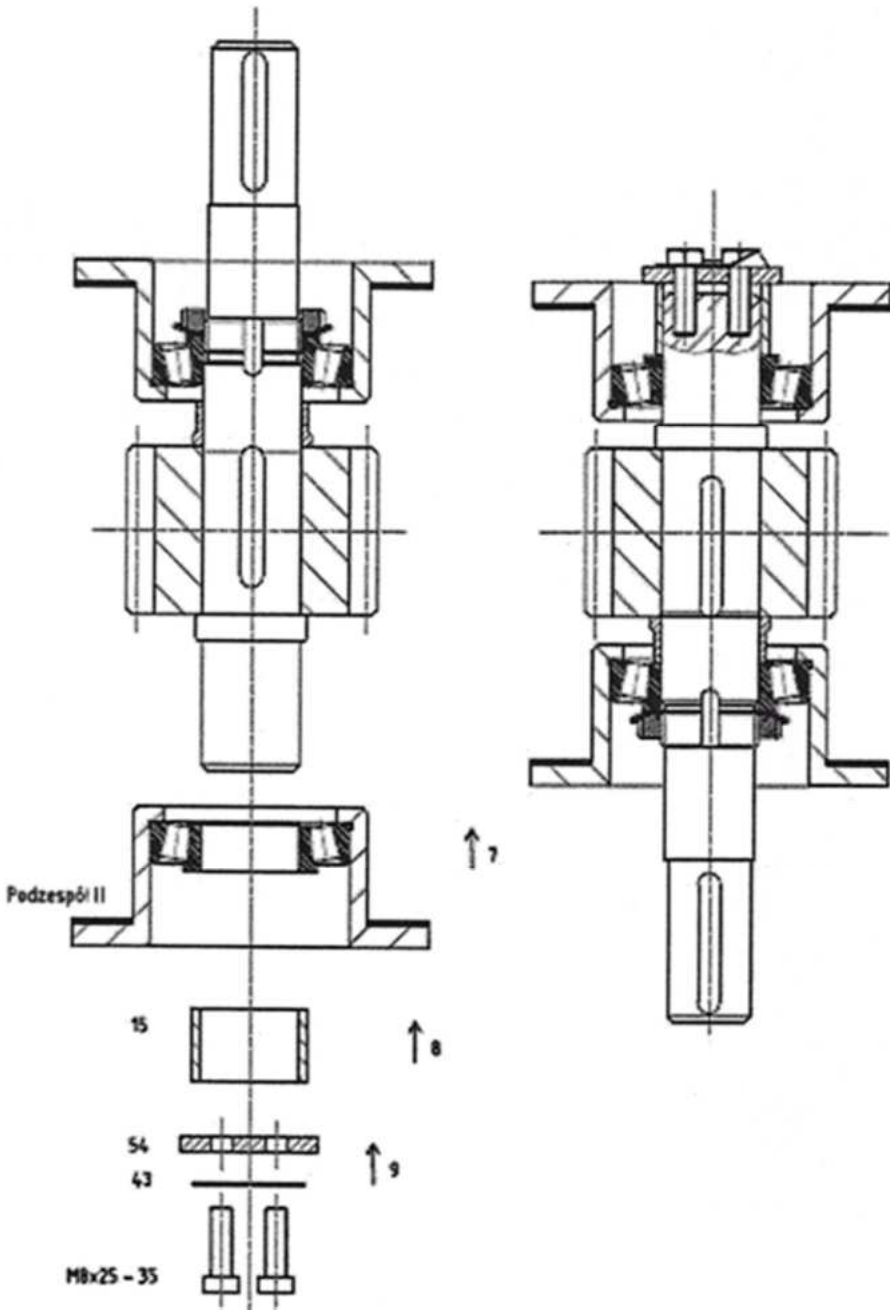


	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	SCHEMAT MONTAŻU ZESPOŁU nazwa Montaż zespołu wolnobieżnego II			T-7
		Symb. zespołu				Nr operacji 40
Treść operacji	Część rysunkowa			Części normalne		
	Il. szt.	Nazwa części	Nr rys.	Il. szt.	Nazwa części i norma	Wymiar
Montaż zespołu wolnobieżnego wału II	1	Walek	5	1	Wpust pryzmatyczny A 10x8x50 PN-70/M-85005	8
	1	Koło zębate	7	1	Podkładka zębata MB7 PN-82/M-86482	35
	1	Tuleja	17	1	Nakrętka łożyskowa KM7 PN-82/M-86478	35
	1	Podzespół tulei II		1	Krążek 50x20 PN-70/M-85011	50
	1	Tuleja	15	1	Śruba M8x25-5,6-B PN-85/M-82105	M8
				1	Podkładka 8,4x20 PN-82/M-82012	8,4
	Opracował		Sprawdził		Zatwierdził	
	Data					
	Podpis					

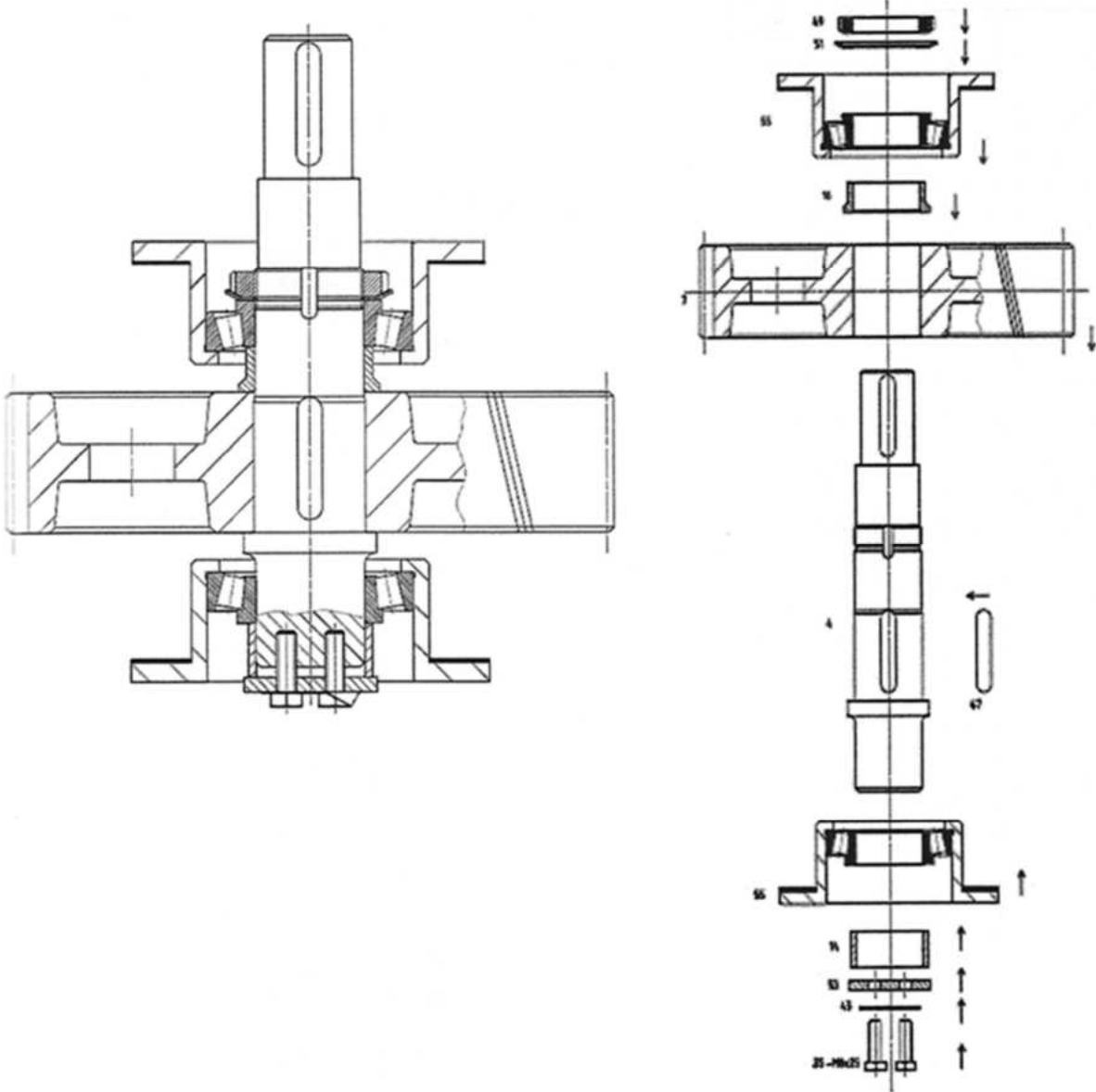


	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż zespołu wolnobieżnego II	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji 40
				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż zespołu wolnobieżnego II	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji 40
				
	Opracował	Sprawdził	Zatwierdził	
Data				
Podpis				



	AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH W KONINIE Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych Katedra Nauk Technicznych	Symb. wyrobu	RYSUNEK ZESPOŁU DO MONTAŻU nazwa Montaż zespołu wolnobieżnego II	T-8
		Symb. zespołu		Nr operacji 40
				
	Opracował	Sprawdził		Zatwierdził
Data				
Podpis				

Źródło: Czasy t_{pz} i t_j zostały zaczerpnięte z *Poradnika inżyniera – obróbka skrawaniem*, t. II, WNT, Warszawa 1993.



Edward Pająk

Rozdział 3. Obróbka ubytkowa

3.1. Wprowadzenie – zakres tematyczny rozdziału

Efektywna działalność każdego, najmniejszego nawet przedsiębiorstwa produkcyjnego czy też usługowego, zależy od możliwości sprzedaży produktów firmy. Brak klientów skłonnych do kupna produktów, jest początkiem końca przedsiębiorstwa. Bo to właśnie klient jest w zasadzie jedynym, który "przynosi do firmy pieniądze". Stąd każde przedsiębiorstwo stara się proponować klientowi produkty, które zyskają jego uznanie i aprobatę. Jednakże wymagania klientów są zróżnicowane. Wiąże się to z koniecznością **personalizacji produktu**, a więc dopasowaniem wytwarzanych produktów w jak największym możliwym stopniu, do wymagań indywidualnego klienta. W odróżnieniu od minionych lat miejsce produkcji seryjnej i masowej, zajmuje **produkcja elastyczna** umożliwiająca szybkie dostosowanie możliwości wytwórczych firmy do zmiennych potrzeb klienta¹.

Produkcja elastyczna wymaga innego oprzyrządowania technologicznego: łatwo przezbrajalnych obrabiarek, które można szybko przystosować do obróbki różnych produktów, zautomatyzowanych środków transportu międzystanowiskowego, jak również robotów przemysłowych ułatwiających prace manipulacyjne na stanowiskach roboczych. Istotnym i chyba najważniejszym problemem całego procesu wytwarzania produktu, czyli popularnie mówiąc produkcji, jest **opracowanie technologii**, a więc sposobu jego wytwarzania. Innymi słowami określenia, w jaki sposób wytwarzany będzie produkt, jakie metody obróbki będą stosowane podczas jego wytwarzania. Jest to zagadnienie kluczowe, gdyż właśnie to technologia (łącznie z konstrukcją) decyduje o dwóch podstawowych dla klienta parametrach; jakości produktu oraz jego kosztach wytwarzania, czyli cenie jaką zapłaci za wyrób. Jeśli producent nie spełni jego oczekiwań, klient zakupi wyrób w innej firmie, która spełni jego oczekiwania.

Produkt, niezależnie od przeznaczenia, zazwyczaj nie jest monolitem. Składa się z elementów zwanych częściami, które w procesie montażu zajmują właściwe położenie w zespole czy też całym produkcie. Przy czym im większa liczba części składowych, tym bardziej skomplikowane jest urządzenie². W zasadzie do końca XX wieku wytwarzanie części oraz ich montaż w gotowy produkt, był efektem pracy jednej firmy. Wykonywała ona wszystkie, lub prawie wszystkie części i zespoły produktu, które następnie w finalnym procesie montowała w gotowy wyrób. Współcześnie coraz więcej firm specjalizuje się w produkcji określonych zespołów (modułów), które produkowane według zasad produkcji elastycznej umożliwiają spełnienie wymagań różnych firm, które wykorzystując dostarczone moduły produkują końcowy wyrób zgodnie ze swoją wizją konstrukcyjną. Tak więc firmy rozmieszczone w różnych miejscach na świecie, współpracują ze sobą w ramach tzw. **łańcuchów dostaw**, umożliwiają klientowi zakup wybranego wariantu produktu, który i tak, niezależnie od jego marki, będzie składał się z modułów produkowanych przez wyspecjalizowane firmy łańcucha dostaw³. Tak więc jeśli kupujemy nowy telewizor, to

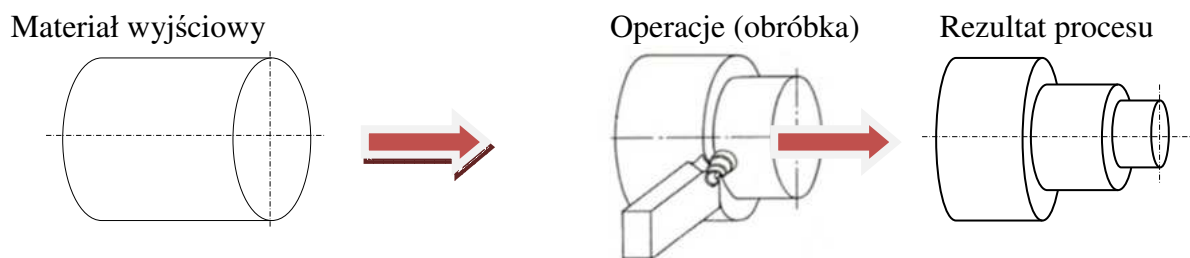
¹ Nie znaczy to wcale, że produkcja seryjna czy masowa całkowicie zaniknie. Absolutnie. Niektóre produkty są i będą również w przyszłości produkowane według wzorców produkcji seryjnej i masowej. Tym niemniej współcześnie produkcja w coraz większej liczbie przedsiębiorstw odbywa się według zasad produkcji elastycznej.

² Przykładowo samolot z okresu II wojny światowej składał się z kilku do kilkunastu tysięcy współpracujących ze sobą części. Współczesny samolot pasażerski składa się z kilkuset tysięcy części składowych.

³ Szacuje się, że w przemyśle motoryzacyjnym finalny producent samochodów, produkuje jedynie ok. 15% części do "swojego" samochodu. Reszta pochodzi od dostawców, a więc firm współpracujących ze sobą w ramach łańcucha dostaw.

niezależnie czy będzie to urządzenie sprzedawane pod marką Phillipsa, Sony, LG czy innych producentów, to i tak przykładowo wyświetlacz (ekran) tego telewizora, pochodzić będzie z tych samych firm specjalizujących się w ich produkcji właśnie wyświetlaczy. Podobnie inne jego elementy, takie jak przykładowo układy scalone – źródłem dostaw jest firma specjalizująca się w produkcji układów scalonych. W takim przypadku firma skoncentrowana jest na poszukiwaniu **nowych technologii wytwarzania i nowych materiałów konstrukcyjnych**, które umożliwią zapewnienie wysokiej jakości produkowanych modułów. A to w efekcie przełoży się na wymaganą przez klienta wysoką niezawodność zakupionego produktu. Nie ulega jednak wątpliwości, że warunkiem takiego modelu produkcji jest sprzyjająca sytuacja geopolityczna, umożliwiająca swobodną wymianę handlową, korzystną dla wszystkich współpracujących firm niezależnie od ich lokalizacji⁴.

Sposób wykonania części jak i ich montażu w końcowy produkt, określony jest dokumentacją technologiczną przygotowywaną przez technologów. Nazywana jest **procesem technologicznym**, a poszczególne **operacje procesu technologicznego** stanowiące kolejne fazy procesu są instrukcją przetwarzania materiału wyjściowego w końcowy produkt procesu. Najczęściej jest to gotową część, która będzie dalej montowana w wyrobie (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Przykładowy rezultat wykonania części według określonego procesu technologicznego

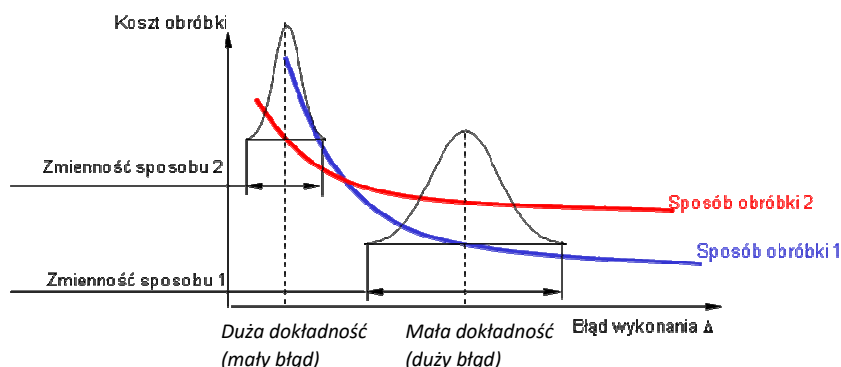
Wymagania związane z wykonaniem określonej części maszyny lub urządzenia, wymaga w pierwszym rzędzie formowania odpowiedniego dla danej części materiału wyjściowego. Wykorzystuje się do tego celu **technologie formujące** (*forming technology*), takie jak przykładowo obróbka plastyczna, odlewanie czy też spiekanie proszków. Kolejne operacje związane są z obróbką, której zadaniem jest nadanie obrabianej części kształtu wymaganego w dokumentacji konstrukcyjnej, dokładności wymiarów oraz jakości powierzchni. Operacje te wykonywane są przez **technologie kształtujące** (*shaping technology*), do których należą metody obróbki skrawaniem, erodowaniem (obróbka erozyjna), czy też metody obróbki specjalnej (mikroobróbki) np. produkcja układów scalonych. W większej części tych metod kształtowanie części następuje w wyniku usuwania zbędnych warstw materiału – stąd często stosowana wspólna nazwa tych metod – **obróbka ubytkowa**⁵. Kończącym etapem produkcji jest połączenie wykonywanych części w gotowy produkt. Odbywa się to zgodnie z opracowaną **technologią montażu** (*linkage technology*)⁶.

⁴ Używa się często określenia "**globalizacja**", co oznacza proces wzrastającej integracji i współzależności państw, społeczeństw, gospodarek i kultur na całym świecie. Sprawia to, że świat poszczególnych krajów i narodów przeobraża się w świat wspólnoty zarówno interesów jak i wzorców. W jakimś stopniu ogranicza to zarówno demokrację jak i wzorzec państwa narodowego.

⁵ Obok kształtowania części maszyn przez obróbkę ubytkową, stosowane są również metody umożliwiające ich kształtowanie poprzez nakładanie materiału warstwami jedna warstwa na drugą. Są to tzw. **technologie przyrostowe**, a przykładem może być między innymi tzw. drukowanie przestrzenne 3D.

⁶ W wielu przypadkach zachodzi konieczność zmiany własności materiału, z którego wykonywane są części maszyny, przykładowo zwiększenie twardości materiału. Do tego celu służą technologie cieplne (*heat technology*) czy też inne technologie usprawniające (*improvement technology*), przykładowo nakładanie powłok ochronnych.

Każda technologia i każda metoda obróbki związana z daną technologią ma swój określony obszar stosowania umożliwiające uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych wyrobu lub jego części, przy określonych kosztach obróbki. Obszar ten nazywany jest obszarem **ekonomicznej dokładności obróbki** (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Ekonomiczna dokładność obróbki

Przedstawiony rysunek wskazuje, że w przypadku konieczności uzyskania większej dokładności wykonania części, celowe będzie zastosowanie sposobu obróbki (metody) oznaczonej na rysunku "2", gdyż w takim przypadku koszty obróbki są mniejsze niż w przypadku zastosowania sposobu "1". Dopuszczenie przez konstruktorów mniejszej dokładności wykonania części wskazuje, że preferowane będzie zastosowanie sposobu "1".

Tak więc podjęta przez inżyniera decyzja dotycząca zastosowania określonego sposobu obróbki musi być poprzedzona wielokryterialną analizą uwzględniającą zarówno różnorodne wymagania konstrukcyjne dotyczące wykonywanego produktu, jak i możliwości wykonawcze i zdolności produkcyjne przedsiębiorstwa.

3.2. Technologie kształtujące

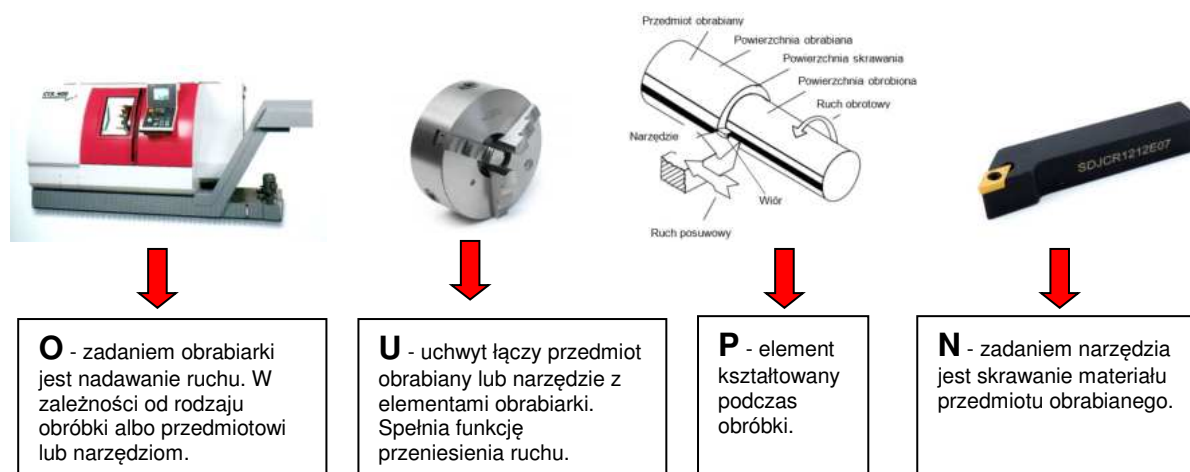
Wyposażenie współczesnych firm produkcyjnych, a więc ich "park produkcyjny", umożliwia stosowanie wielu metod obróbki zaliczanych do technologii kształtujących. Dominują jednak wśród nich metody obróbki ubytkowej, a główną przyczyną tej dominacji jest możliwość spełnienia prawie wszystkich wymagań związanych z wydajnością, dokładnością i jakością, przy akceptowalnych (stosunkowo niskich) kosztach obróbki.

Niektóre z tych metod obróbki znane są już od stuleci (przykładowo obróbka ścierna), inne zaś są rezultatem najnowszych osiągnięć techniki - przykładowo obróbka laserowa, czy też obróbka mikroczęści, których wymiary porównywalne są do wymiarów atomu (mikroobrobka). Stanowiska obróbki ubytkowej (stanowiska robocze), wyposażone są coraz częściej w urządzenia technologiczne, potocznie zwane maszynami lub obrabiarkami, które nie tylko spełniają kryteria **mechanizacji** obróbki (a więc eliminują siłę mięśni ludzi używaną do napędu tych maszyn), ale również **automatyzacji**. W tym ostatnim przypadku urządzenia technologiczne samodzielnie wykonują zadania określone programem wprowadzonym do ich układu sterowania. Są to urządzenia sterowane numerycznie CNC (*Computer Numerical Control*). Niezależnie jednak od rodzaju i stopnia nowoczesności tych maszyn, istota i "mechanizm" samego usuwania materiału pozostaje niezmienny.

3.2.1. Proces obróbki skrawaniem

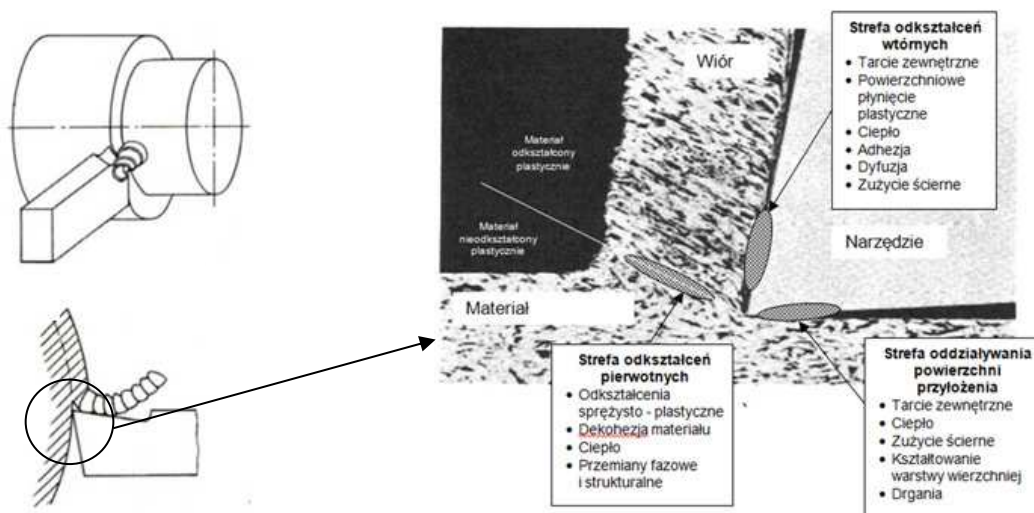
Podczas procesu obróbki skrawaniem następuje sukcesywne usuwanie warstw materiału obrabianego. Z materiału wyjściowego usuwane są warstwy materiału w taki sposób, aby w wyniku obróbki uzyskać część maszyny lub urządzenia, zgodną z dokumentacją konstrukcyjną (rysunkiem technicznym) zarówno pod względem kształtu, wymiarów jak i wymaganej dokładności i jakości powierzchni. Usuwany materiał zamieniony zostaje na wióry. W przypadku jeśli materiałem skrawanym jest metal – są to wióry metalowe.

Proces obróbki skrawaniem wymaga współdziałania określonych elementów nazwanych łącznie **układem o-u-p-n**. Stanowi go: *obrabiarka (o)*, *uchwyt (u)*, *przedmiot obrabiany (p)* oraz *narzędzie (n)* – rys. 3.3.



Rys. 3.3. Schemat układu o-u-p-n

Układ o-u-p-n musi zapewnić odpowiednie warunki do rozpoczęcia procesu obróbki skrawaniem, zwanym krócej **procesem skrawania**. Narzędzie skrawające, musi zostać wprowadzone do materiału obrabianego z określoną siłą na określoną głębokość. Następnie konieczne jest wykonywanie ruchu względnego narzędzia i materiału obrabianego, przy czym ruch ten zależny jest od sposobu obróbki. W wyniku tego działania następuje usuwanie warstwy materiału zwanej naddatkiem na obróbkę, przez co ukształtowana zostaje powierzchnia przedmiotu obrabianego. Usuwany materiał zamieniany zostaje na wiór stanowiący odpad w procesie obróbki skrawaniem – rys. 3.4.



Rys. 3.4. Schemat usuwania materiału obrabianego w trakcie obróbki wiórowej

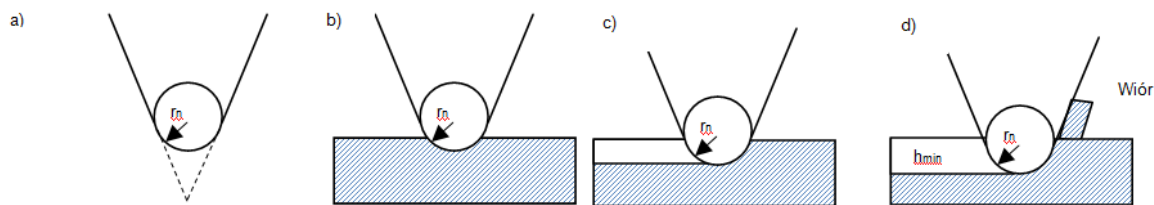
Źródło: Opracowano na podst.: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*, PWSZ w Koninie, Konin 2016.

Jak wspomniano, obróbka skrawaniem wymaga odpowiednio ukształtowanego narzędzia. Jego ostrze ma formę klina, gdyż taka umożliwia zmniejszenie siły niezbędnej do zagłębienia narzędzia w materiał obrabiany, co jest warunkiem inicjacji procesu skrawania. W rzeczywistych warunkach obróbki krawędź skrawająca narzędzia tworząca kąt ostrza nie jest idealnie ostra, lecz jest zaokrąglona promieniem r_n (rys. 3.5a). Wartość promienia zaokrąglenia decyduje o konieczności większej lub mniejszej wartości "h" zagłębienia ostrza w materiał obrabiany. Wiąże się to z użyciem większej lub mniejszej siły zagłębiającej ostrze w materiał. Minimalna (graniczna) grubość warstwy skrawanej (h_{min}), powyżej której nastąpi rozpoczęcie procesu skrawania (usuwania wióra), określona jest zależnością:

$$h_{min} = k \cdot r_n.$$

We wzorze tym współczynnik proporcjonalności k zależy od warunków tarcia między ostrzem a materiałem obrabianym. Dla tarcia suchego wynosi $k = 0,1$ do $0,2$, dla tarcia półsuchego (zastosowanie płynu obróbkowego) $k = 0,2$ do $1,0$. Przedstawiona zależność wskazuje, że zwiększenie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n narzędzia wymaga większego zagłębienia narzędzia. Jeśli to nie nastąpi, ostrze narzędzia będzie ślizgać się po powierzchni materiału obrabianego, lecz proces usuwania wióra nie zostanie rozpoczęty. Tak więc warunkiem rozpoczęcia procesu skrawania jest spełnienie warunku $h > h_{min}$ (rys. 3.5)⁷.

⁷ Podobna sytuacja występuje w przypadku innych narzędzi np. noża kuchennego. Jeśli nie będzie naostrzony, czyli zmniejszona wartość promienia r_n , to ucięcie czegośkolwiek, czy nawet ukrojenie skibki chleba będzie problemem. Będziemy chleb ugniatali, kruszyli, ale skibki nie ukroimy. Chyba że nóż naostrzymy, czyli zmniejszymy promień r_n .



Rys. 3.5. Etapy mikroskrawania: a) porównanie ostrza rzeczywistego z teoretycznym (przerwywania linia), b) odkształcenia sprężyste, c) postępujące odkształcenia sprężysto – plastyczne, d) mikroskrawanie – usuwanie materiału w postaci wióra.

Źródło: Opracowano na podst.: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Kluczowe znaczenie w procesie obróbki ma również rodzaj materiału, z którego wykonane jest narzędzie skrawające, a szczególnie jego twardość i zdolność utrzymania tej wysokiej twardości w wysokich temperaturach, gdyż takie występują w procesie skrawania⁸. Ponieważ współczesne konstrukcje wykonywane są z materiałów o coraz to wyższych właściwościach wytrzymałościowych (w tym twardości), stąd coraz wyższe wymagania stawiane są materiałom narzędziowym⁹.

Ruch względny narzędzia oraz przedmiotu obrabianego niezbędny do rozpoczęcia procesu skrawania zapewnia obrabiarka. Charakterystyczne dla procesów obróbki skrawaniem jest to, że ruch ten jest różny w odniesieniu do różnych metod skrawania, co przedstawiono w dalszej części rozdziału. Wióry będące rezultatem nadania wymaganych parametrów wytwarzanym częściom, są oddzielane na skutek sił skrawania. Pod ich wpływem następuje początkowo odkształcanie, a później dekohezja materiału (zniszczenie wiązań wewnętrznych materiału) i tym samym oddzielenie wióra od materiału obrabianego.

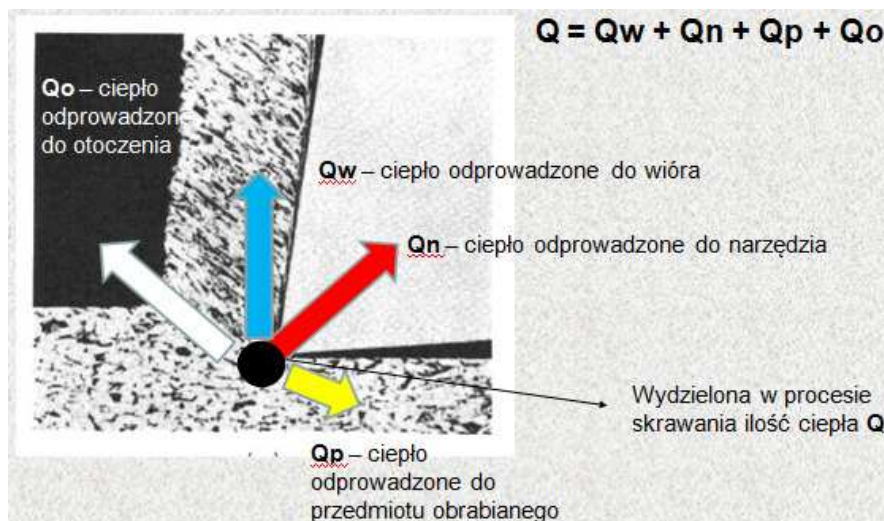
Równocześnie między narzędziem i materiałem obrabianym występują znaczne siły tarcia, a bezpośrednim rezultatem ich działania jest wydzielenie znacznej ilości ciepła, czego efektem jest znaczny wzrost temperatury w strefie skrawania. Ilość ciepła wydzielonego w strefie skrawania w trakcie obróbki jest proporcjonalna do siły skrawania F oraz prędkości skrawania v_c (prędkości ruchu względnego przedmiotu obrabianego i narzędzia): $Q = F \cdot v_c$.

Bilans cieplny w strefie obróbki wskazuje, że powstające podczas skrawania ciepło Q przenika do (rys.1.6):

- materiału obrabianego Q_P , zmieniając jego strukturę (głównie pogarsza właściwości wytrzymałościowe),
- materiału narzędzia Q_N , zmniejszając jego twardość, a więc stwarzając warunki sprzyjające zwiększeniu zużycia narzędzia,
- wióra Q_w - ten kierunek przepływu ciepła jest najbardziej korzystny, gdyż nie powoduje zmian właściwości materiału obrabianego i materiału narzędzia,
- otoczenia (powietrza) lub także do płynu obróbkowego Q_o , jeśli jest on stosowany.

⁸ Trudno wyobrazić sobie hipotetyczną sytuację, kiedy przykładowo nóż kuchenny był wykonany z materiału, którego twardość byłaby mniejsza od ciętej na plasterki wędliny. Nie byłibyśmy w stanie takiej operacji wykonać, a w zasadzie działalibyśmy odwrotnie – twardszą wędliną cięli bardziej miękki nóż!!!

⁹ Przykładowo niektóre osłony pojazdów kosmicznych wykonywane są z materiałów, których nie można skrawać efektywnie nawet narzędziem wykonanym z najtwardszego w przyrodzie materiału – diamentu.



Rys. 3.6. Bilans cieplny procesu skrawania

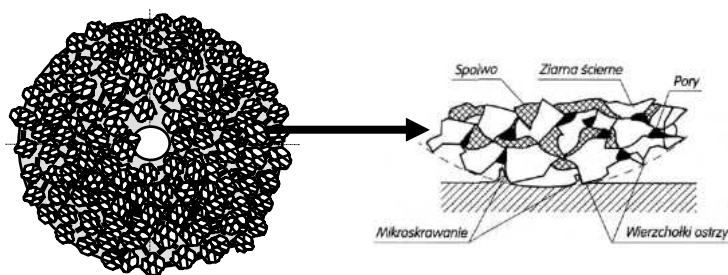
W przypadku stosowania płynów obróbkowych (a więc w trakcie tzw. skrawania na mokro), część wydzielonego w procesie ciepła odprowadzona jest przez płyn, lecz niestety wraz z zanieczyszczeniami. Wymaga to kosztownej utylizacji płynu. Z tego między innymi względu współczesne technologie wskazują na celowość "skrawania na sucho", czyli bez użycia płynu obróbkowego lub też zminimalizowanie ilości stosowanego płynu (chłodzenie pod ciśnieniem lub ze zminimalizowaną ilością płynu).

Jak już wspomniano, w rezultacie procesu obróbki skrawaniem powstają odpowiednio ukształtowana część maszyny, ale również wióry będące "odpadem" z realizowanego procesu. Z tego też względu używana jest również inna nazwa tego procesu – **obróbka wiórowa**. Wykorzystując opisaną wyżej charakterystykę procesu skrawania realizowany jest inny proces obróbki skrawaniem – **obróbka ścierna**. Istota tej obróbki jest rezultatem skrawania narzędziami składającymi się z ziaren ściernych o niewielkich wymiarach najczęściej w granicach od 50 do 1500 μm . Ze względu na niewielki wymiar ziarna także i promień zaokrąglenia ostrza ziarna ściernego będzie niewielki, a więc i minimalna głębokość skrawania $h_{\min}$ niewielka. Dzięki niewielkiej grubości warstwy skrawanej, powstaje niewielki wiór (praktycznie niewidoczny gołym okiem), który pod wpływem ciepła powstającego w procesie skrawania ulega spaleni (stąd charakterystyczny dla tej obróbki snop iskier występujący w trakcie obróbki). Niewielkie wymiary ziaren ściernych pozwalają na usuwanie materiału obrabianego w postaci "małych wiórków". Z tego względu wydajność obróbki ścierniej jest mniejsza od wydajności obróbki wiórowej (występuje wiór o znacznie większych wymiarach). Lecz właśnie skrawanie materiałów "małymi wiórkami", stwarza możliwości do osiągania bardzo korzystnych wartości parametrów charakteryzujących dokładność i jakość obrabianych części. Z tego względu obróbka ścierna stosowana jest przede wszystkim w przypadkach, kiedy wymagana jest większa dokładności wymiarów oraz jakość powierzchni obrabianej części (w takim przypadku mówi się o **obróbce wykańczającej**). Dla porównania obróbka wiórowa umożliwia wydajniejsze skrawanie materiału, ale z mniejszą dokładnością. Stąd zalicza się ją do grupy **obróbek kształtujących** lub **zgrubnych** (w tym przypadku decydującym kryterium stosowania takiej obróbki jest jej wysoka wydajność).

Obróbka ścierna stosowana może być w dwóch odmianach, które różnią się między sobą sposobem nadawania ruchu względnego ziarna ściernego i materiału obrabianego. Jest to obróbka:

- **luźnym ścierniwem** – pojedyncze ziarna ścierne znajdują się w płynach lub pastach, a ich ruch spowodowany jest ruchem ośrodka ciekłego lub gazowego, w którym się znajdują (np. obróbka strumieniowo-ścierna), lub poprzez dociskanie ziaren ściernych do powierzchni obrabianej z określoną siłą (np. docieranie),
- **narzędzi spojonych** – ziarna ścierne związane są ze sobą spoiwem; wymuszenie ruchu ziarna niezbędnego w procesie skrawania materiału odbywa się poprzez ruch całego narzędzia ściernego (jest to najczęściej, chociaż nie zawsze, ruch obrotowy); zazwyczaj do określenia tego sposobu obróbki używa się terminu **szlifowanie**, a narzędzie ścierne stosowane podczas szlifowania nazywane jest **ściernicą** lub w innych przypadkach tej obróbki osełką ścierną.

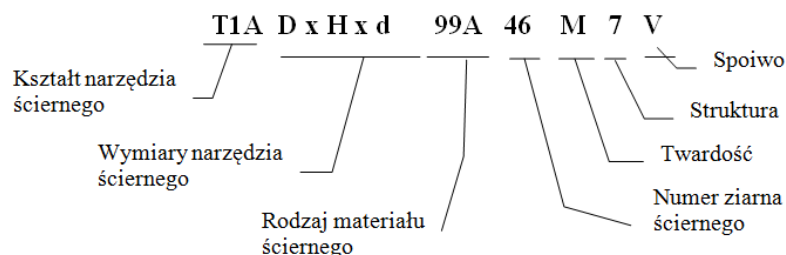
Ściernica jest to narzędzie składające się z nieprzeliczalnej praktycznie liczby ziaren ściernych o różnej geometrii, które jednak muszą być ze sobą połączone materiałem nazwanym spoiwem, tworząc stabilne narzędzie (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Schemat narzędzia ściernego (ściernicy)

Tak więc objętość ściernicy stanowi suma objętości zajętej przez ziarna ścierne V_{sc} , objętości tzw. mostków spoiwa łączących między sobą ziarna ścierne V_{sp} oraz objętości przestrzeni wolnych zwanych porami V_p . W tych właśnie porach gromadzą się „mikro wiórki”, które w trakcie ruchu obrotowego ściernicy wyrzucane są poprzez siłę odśrodkową z por ściernicy znajdujących się na jej zewnętrznej powierzchni. W procesie mikroskrawania bierze udział tylko część ziaren narzędzia. Przede wszystkim te, które tworzą zewnętrzną jego powierzchnię. Niektóre z nich rysują tylko powierzchnie obrabianą, inne trą o nią powodując wydzielanie znacznych ilości ciepła, a tylko pewna ich część wykonuje pracę skrawania (oddzielania wiórów). Wynika to z faktu, że tylko niektóre z ziaren zagłębiają się w materiał obrabiany na głębokość przekraczającą minimalną wartość grubości warstwy skrawanej h_{min} . Pozostałe ziarna ścierne, znajdujące się w „głębszych” warstwach narzędzia ściernego chwilowo nie biorą udziału w procesie skrawania, aż do momentu, kiedy nastąpi wykruszenie ziaren ściernych biorących czynny udział w procesie obróbki.

Producenci narzędzi ściernych wytwarzają różne narzędzia ścierne – przykładowo zawierające więcej ziaren ściernych (czyli rośnie V_{sc} , a wówczas obróbka jest bardziej wydajna) lub zawierające więcej spoiwa (czyli rośnie V_{sp} , a wówczas narzędzie ścierne mniej się zużywa), bądź też inne. Wymagania stawiane narzędziom ściernym określa **charakterystyka narzędzia ściernego** (rys. 3.8). Dobór tej charakterystyki decyduje o efektach procesu obróbki ścierniej.



Rys. 3.8. Przykładowe oznaczenie charakterystyki ściernicy wg Polskich Norm

Źródło: Opracowano na podst.: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Procesy obróbki skrawaniem, a więc obróbki wiórowej czy też ścierniej dzielą się na **techniki wytwarzania**. Najczęściej stosowane w ramach procesów obróbki wiórowej techniki wytwarzania to: toczenie, frezowanie, wiercenie, struganie, dłutowanie (rys. 3.9). Poszczególne techniki wytwarzania i procesy wykonywane w ramach tych technik, różnią się od siebie głównie kinematyką. Przykładowo podczas procesu toczenia ruch główny obrotowy wykonuje przedmiot obrabiany, a narzędzie wykonuje ruch posuwowy. W przypadku procesu frezowania kinematyka obróbki jest inna - ruch główny, obrotowy wykonuje narzędzie (frez), a ruch posuwowy przedmiot obrabiany zamocowany na stole obrabiarki.

Technika wytwarzania	Szkic	Opis
Toczenie		Proces toczenia przeznaczony jest do obróbki powierzchni obrotowych głównie zewnętrznych. Przedmiot wykonuje ruch obrotowy (główny), narzędzie (nóż tokarski) ruch posuwowy wzdłuż powierzchni obrabianej. Narzędzie jednoostrzowe o określonej geometrii ostrza.
Frezowanie		Proces frezowania przeznaczony jest do obróbki powierzchni płaskich oraz rowków o różnych kształtach. Przedmiot wykonuje ruch posuwowy, natomiast narzędzie ruch obrotowy (główny). Narzędzie wieloostrzowe – frez, składa się z przeliczalnej liczby ostrzy (zwanymi zębami) o określonej geometrii ostrza.
Wiercenie		Proces wiercenia przeznaczony do wykonywania okrągłych otworów. Narzędzie (wiertło) wykonuje ruch posuwowy i obrotowy (główny), przedmiot nie wykonuje podczas obróbki żadnych ruchów. Zwiększanie dokładności wierconego otworu możliwe jest w procesie rozwiercania o kinematyce takiej samej jak kinematyka wiercenia.
Struganie		Proces strugania przeznaczony jest do obróbki powierzchni płaskich oraz rowków (obszar stosowania zbliżony do frezowania). Narzędzie jednoostrzowe (nóż strugarski). Zazwyczaj przedmiot nie wykonuje ruchu, natomiast ruch główny i posuwowy są ruchami prostoliniowymi. Proces stanowi alternatywę frezowania, lecz jego wydajność jest znacznie niższa niż procesu frezowania.
Dłutowanie		Proces dłutowania przeznaczony do wykonywania rowków, szczególnie w otworach. Kinematyka procesu jest podobna do kinematyki strugania, z tym, że ruch główny odbywa się pionowo (podczas strugania – poziomo). Narzędzie jednoostrzowe zwane dłutakiem.

Rys. 3.9. Techniki wytwarzania procesu obróbki wiórowej

Źródło: E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, PWN, Warszawa 2021.

Podstawowe techniki wytwarzania procesu obróbki ścierniej przedstawione są na rys.1.10.

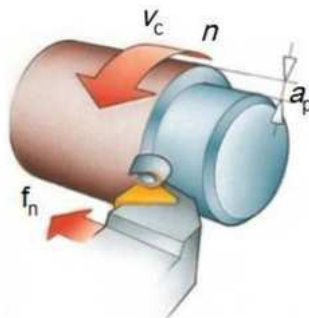
Technika wytwarzania	Szkic	Opis
Obróbka narzędziami spojonymi - szlifowanie ściernicą		Proces szlifowania przeznaczony jest do obróbki powierzchni obrotowych (szlifowanie wałków), powierzchni płaskich (szlifowanie płaszczyzn) i otworów (szlifowanie otworów) głównie zewnętrznych. Narzędzie ściernie zwane ściernicą wykonuje ruch obrotowy (główny), pozostałe ruchy przedmiot obrabiany lub narzędzie. Podczas szlifowania prędkość ruchu głównego jest średnio 50 razy wyższa niż podczas obróbki wiórowej (prędkość szlifowania wynosi ok.60 m/s).
Obróbka narzędziami spojonymi - gładzenie (honowanie)		Proces gładzenia przeznaczony jest do obróbki otworów. Umożliwia uzyskanie gładkich powierzchni otworu, co w wielu przypadkach zwiększa trwałość produkowanego zespołu (np. tulei cylindrycznych). Narzędziem jest ośleka ścierna wykonująca ruch posuwisto - zwrotny.
Obróbka narzędziami spojonymi - dogładzanie oscylacyjne		Proces dogładzania podobny jest do procesu gładzenia, lecz przeznaczony przede wszystkim dla powierzchni cylindrycznych, zewnętrznych. Narzędzie (ośleka ścierna) wykonuje oprócz ruchu roboczego także oscylacje, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie chropowatości obrabianej powierzchni.
Obróbka luźnym ścierniwem - docieranie, polerowanie.		Proces docierania i polerowania stosowany w przypadku znacznych wymagań dotyczących jakości powierzchni przedmiotu obrabianego. Luźne ziarna ściernie umieszczone są w nośniku (pasta ścierna, olej itp.) i przemieszczając się zgodnie z jego ruchem, skrawają materiał obrabiany. Proces ten należy do grupy obróbek bardzo dokładnych.

Rys. 3.10. Techniki wytwarzania procesu obróbki ścierniej

Źródło: E. Pająk, *Zarządzanie produkcją*.

Każdy z procesów obróbki skrawaniem może być prowadzony w odmiennych warunkach, od których zależy możliwość osiągnięcia wymaganych efektów obróbki (czyli umożliwiając one sterowanie procesem obróbki). Warunki te określone są parametrami skrawania do których należą (rys. 3.11):

- prędkość skrawania (prędkość ruchu głównego) v_c [m/min],
- prędkość ruchu posuwowego (prędkość posuwu), przy czym posuw może być określony jako posuw minutowy f [mm/min] lub posuw na obrót narzędzia f_n [mm/obr.], gdzie n jest oznaczeniem obrotów narzędzia lub przedmiotu obrabianego,
- głębokość skrawania a_p [mm].



Rys. 3.11. Parametry skrawania określone dla toczenia wzdłużnego

Źródło: www.ebmia.pl

Wszystkie wymienione parametry mają istotny wpływ na efekty procesu skrawania, lecz wśród nich dominującą rolę odgrywa **prędkość skrawania**. Zwiększenie prędkości skrawania to możliwość krótszego czasu skrawania (zwiększenie wydajności obróbki), lepsza jakość powierzchni (na skutek zmniejszenia sił skrawania), ale również szybsze zużycie narzędzia, czy też niekorzystny wzrost temperatury w strefie skrawania. Dla obróbki wiórowej wartość prędkości skrawania najczęściej oscyluje w zakresie od 300 do 150 m/min. (**0,5 do 2,5 m/s**). Jednak jest to zależne od rodzaju materiału konstrukcyjnego wytwarzanej części, rodzaju materiału narzędziowego a także od stosowanej techniki wytwarzania. Zdecydowanie wyższe prędkości skrawania (kilkukrotnie wyższe), występują podczas obróbki ścierniej. W tym przypadku prędkość skrawania wynosi przeciętnie od 1200 do 3000 m/min. (**20 do 50 m/s**). Jedną z ważniejszych przyczyn takiego zróżnicowania wartości prędkości skrawania jest dążenie do zwiększenia wydajności procesu obróbki ścierniej¹⁰.

Przełom XX i XXI w., tak jak i okresy poprzedzające, zaowocował dużą liczbą wynalazków i usprawnień, w tym w zakresie obróbki skrawaniem. Głównym powodem intensywnego rozwoju były nowe materiały konstrukcyjne rozwijane z myślą o zwiększeniu wytrzymałości konstrukcji, redukcji masy produktu (to umożliwia zmniejszenie zużycia energii, np. paliwa do samochodów i samolotów), a także zwiększenie odporności na wysokie temperatury czy korozję. Stąd na rynku pojawiły się stale wysokowytrzymałe AHSS (*Advanced High Strength Steels*), stopy tytanu, ultralekkie stopy magnezu i aluminium z dodatkami pierwiastków ziem rzadkich¹¹ lub stopy amorficzne (metaliczne szkła)¹². W prawie każdym przypadku zastosowania tych materiałów pojawia się problem ich obróbki. Do ich przetwarzania konieczne są narzędzia z supertwardych materiałów (np. cermetale, kompozyty z diamentem), a także odpowiednie urządzenia technologiczne (maszyny do obróbki skrawaniem, ale także pracujące według innych technologii – patrz kolejny rozdział 3.2.2).

Współczesna obrabiarka spełnia funkcje takie jak maszyny z poprzednich wieków. Ich podstawowym zadaniem jest (i było) nadanie przedmiotowi obrabianemu lub też narzędziom skrawającym, ruchu względem przedmiotu obrabianego – tak, aby można było rozpocząć proces skrawania. Rozwój konstrukcji obrabiarek przedstawiono na rys. 3.12.



Tokarka z XVI



Tokarka z przełomu XIX/XX w.



Współczesne centrum tokarskie

Rys. 3.12. Przykład rozwoju tokarek na przestrzeni wieków

¹⁰ Należy przypomnieć, że w przypadku obróbki ścierniej skrawanie odbywa się przez usuwanie małych wiórków ziarnami ściernymi o niewielkich wymiarach. Stąd i proces usuwania materiału jest z gruntu rzeczy powolny. Zwiększenie prędkości usuwania materiału jest możliwe przez zwiększenie prędkości skrawania. W takim przypadku większa prędkość narzędzia powoduje, że ziarna ściernie zwiększają częstotliwość oddziaływania na materiał obrabiany, a to zwiększa wydajność procesu.

¹¹ Pierwiastki ziem rzadkich (REE – *Rare Earth Elements*) to aktualnie 17 pierwiastków chemicznych o wyjątkowych właściwościach magnetycznych, optycznych i chemicznych (np. cer, neodym, europ, iter, scand i inne). Choć nazwa sugeruje ich rzadkość, są stosunkowo powszechne w skorupie ziemskiej, ale trudne do pozyskania w czystej postaci.

¹² Stop amorficzny (*metallic glass*) jest to materiał metaliczny, który nie ma uporządkowanej struktury krystalograficznej, typowej dla zwykłych metali. Zamiast tego ma strukturę amorficzną – podobną do szkła – co oznacza, że atomy są rozmieszczone chaotycznie. Charakteryzuje się głównie bardzo wysoką twardością.

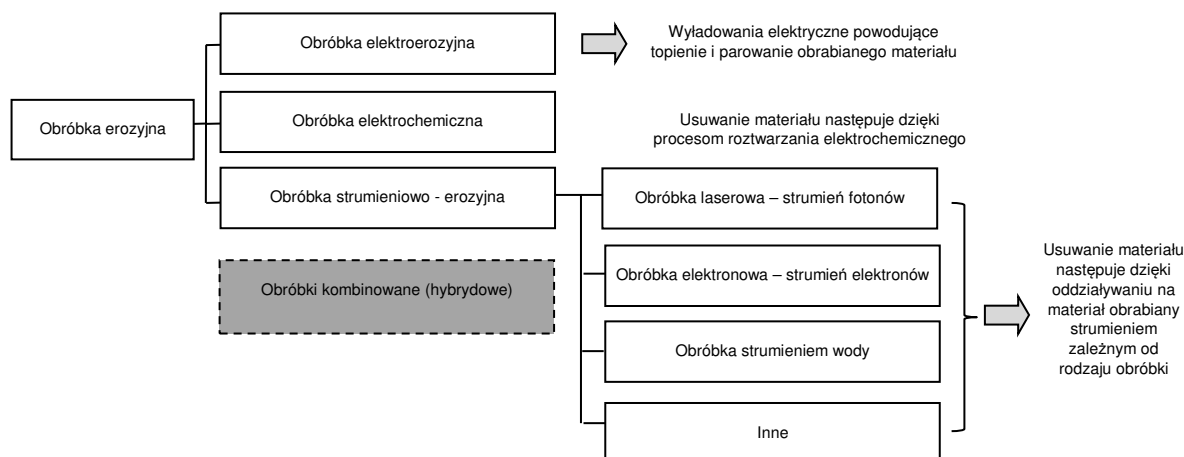
Aczkolwiek pierwsze tokarki stosowane już był w starożytnym Egipcie, to jednak ich bardziej dojrzałą formę konstrukcyjną przedstawił Leonardo da Vinci ok. 1500 roku. Wrzeczono tokarki napędzane było siłą mięśni ludzkich. Dopiero mechanizacja z okresu II rewolucji przemysłowej, pozwoliła na zastosowanie napędu elektrycznego. Pracownik operując różnymi pokrętlami przemieszczał odpowiednio narzędzie względem przedmiotu i nastawiał wymagane parametry obróbki, tak aby osiągnąć zakładaną dokładność i jakość obróbki. Współczesna obrabiarka, to obrabiarka CNC (*Computer Numerical Control*). Układ sterowania numerycznego pozwala na wyeliminowanie udziału pracownika w jej obsłudze. Do układu sterującego obrabiarki wprowadzony jest program, który definiuje przemieszczanie narzędzi lub przedmiotu obrabianego, a także stosowane parametry skrawania.

Właśnie tu widoczny jest olbrzymi postęp w zakresie obróbki skrawaniem. Wieloosiowe centra obróbkowe, pozwalają na tzw. **obróbkę kompletną**, czyli wykonanie części produktu w jednym zamocowaniu. Wynikiem jest zwiększenie dokładności obróbki i zmniejszenie czasu wykonania. Centra obróbkowe wyposażone są w magazyny narzędzi, co zwiększa ich możliwości obróbkowe. Bywają połączone z robotami przemysłowymi, tworząc system automatycznego podawania materiału, lub urządzeniami zautomatyzowanego transportu wewnętrznego (wózki samojezdne AGV – *Automated Guided Vehicle*). Możliwości techniczne (szczególnie w mikroelektronice) już obecnie stwarzają warunki do budowy „bezludnych fabryk”, w których udział człowieka ograniczony jest do nadzoru systemu produkcyjnego.

Jednak nie zawsze sama konstrukcja urządzenia technologicznego (obrabiarek, robotów, wózków transportowych itd.) wystarcza. Materiały konstrukcyjne są „zbyt trudne do obróbki”, a wydajność, niekiedy również dokładność obróbki niezadowalająca. Potrzeba rozwiązania chociażby zasygnalizowanych problemów był impulsem dla inżynierów naukowców – konieczne stało się opracowanie nowych technologii. Tak więc grupę obróbek ubytkowych uzupełniły technologie **obróbki erozyjnej** oraz technologie hybrydowe.

3.2.2. Procesy obróbki erozyjnej

W większości przypadków obróbki erozyjnej ubytek materiału obrabianego następuje w wyniku oddziaływania ciepła, którego rezultatem jest topienie, a także częściowe odparowanie materiału obrabianego. W przypadku obróbki elektroerozyjnej ciepło jest wynikiem wyładowania elektrycznego, a w przypadku obróbki strumieniowo – erozyjnej ciepło jest końcowym rezultatem oddziaływania energii kinetycznej strumienia fotonów (obróbka laserowa) lub elektronów (obróbka elektronowa) – rys. 3.13.



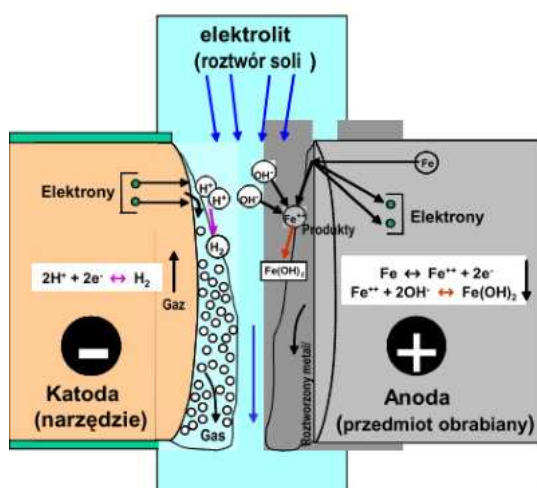
Rys. 3.13. Klasyfikacja procesów obróbki erozyjnej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

W wyniku opisanego procesu wymiary cząstek materiału usuwanego podczas kształtowania części (nie można w takim przypadku mówić o wiórze), są niewielkie, niezauważalne nieuzbrojonym okiem. Z rys. 3.13 wynika, że do grupy obróbek erozyjnych zaliczana jest również obróbka elektrochemiczna wykorzystująca zjawiska elektrochemiczne do usuwania materiałów oraz obróbka hybrydowa stanowiąca połączenie oddziaływania różnych czynników, umożliwiających usuwanie materiału obrabianego (np. połączenie obróbki skrawaniem z obróbką laserową).

3.2.2.1. Obróbka elektrochemiczna – ECM

Obróbka elektrochemiczna ECM (*Electro Chemical Machining*) jest metodą kształtowania materiałów przewodzących prąd elektryczny. Proces ten opiera się na „odwróconej elektrolizie”. Przedmiot obrabiany (katoda) i narzędzie (anoda) zanurzone są w elektrolicie (najczęściej stosowanym elektrolitem jest wodny roztwór NaCl lub NaNO₃). Między elektrodami przepływa prąd o dużym natężeniu (50 do nawet 40000A), aby zwiększyć wydajność obróbki i małym napięciu (5 do 20V), aby unikać powstawania wyładowania elektrycznego, które niszczy powierzchnię obrabianą. Narzędzie wykonane jest zazwyczaj z mosiądzu lub brązu, jest negatywem kształtu odwzorowanego na przedmiocie obrabianym (rys. 3.14).



Rys. 3.14. Schemat rozprawy elektrochemicznej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

W wyniku rozprawy elektrochemicznej na anodzie (przedmiot obrabiany) zachodzi proces rozprawy metalu¹³, natomiast na katodzie wydzielą się gaz (najczęściej wodór). Jeśli narzędzie zostanie odpowiednio ukształtowane, to kształt narzędzia zostanie odwzorowany na przedmiocie obrabianym. Przepływ prądu w procesie elektrolizy powoduje usuwanie materiału obrabianego; umownie "atom po atomie". Z tego względu wydajność procesu jest niewielka, natomiast jakość i dokładność wykonania ekstremalnie wysoka. W trakcie usuwania materiału obrabianego obie elektrody zbliżają się do siebie z prędkością

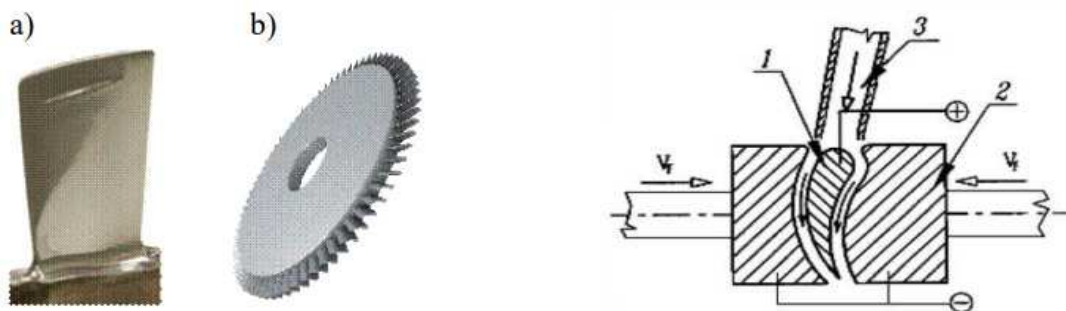
¹³ Prawa elektrolizy zostały sformułowane przez Faradaya w 1834 roku. Jedno z nich mówi, że masa substancji wydzielonej podczas elektrolizy (m), jest proporcjonalna do: natężenia przepływającego w trakcie elektrolizy prądu (I), czasu jego przepływu (t) oraz równoważnika elektrochemicznego (k) zależnego od rodzaju materiału; $m = k \cdot I \cdot t$ lub prędkość usuwania materiału $m/t = k \cdot I$. Stanowi ono podstawę rozprawy elektrochemicznej, a więc procesu obróbki elektrochemicznej.

posuwu rzędu 0,1 do 20 mm/min., przy czym prędkość ta uzależniona jest od prędkości usuwania materiału.

Dla współpracujących ze sobą części maszyn, szczególnie istotna jest stan powierzchni materiału części wraz z bezpośrednio do niej przylegającym obszarem podpowierzchniowym, którego właściwości różnią się od właściwości głębszych warstw tego materiału. Ten obszar nazywany jest **warstwą wierzchnią**. Jakość warstwy wierzchniej jest niewrażliwym parametrem wielu części maszyn, decydującym o **niezawodności produktu**. Wynika to z faktu, że współpracujące części różnych mechanizmów, stykają się ze sobą właśnie zewnętrznymi powierzchniami. Mikropęknięcia w warstwie wierzchniej pod wpływem różnych obciążeń "penetrują" w głąb materiału części, powodując po pewnym okresie eksploatacji jej zniszczenie.

Źródłem mikropęknięć są **naprężenia wewnętrzne** wprowadzane do przedmiotu w trakcie jego kształtowania (technologii formujących i kształtujących). Im większe naprężenia wewnętrzne, tym oczywiście większa skłonność do powstawania mikropęknięć. Naprężenia te zwane również naprężeniami obróbkowymi, zależą głównie od sił występujących podczas obróbki (np. podczas usuwania warstwy materiału w procesie skrawania) lub ciepła występującego w trakcie obróbki. I tak przykładowo naprężenia w odlewach są wynikiem oddziaływań cieplnych, a w częściach obrabianych plastycznie na zimno – od sił powodujących odkształcenie materiału. W przypadku niektórych procesów (np. obróbki wiórowej i ściernej), występuje wspólne oddziaływanie zarówno sił jak i ciepła.

Dla obróbki elektrochemicznej charakterystyczny jest fakt, że podczas usuwania materiału obrabianego praktycznie nie występują ani siły, ani oddziaływania cieplne. Stąd warstwa wierzchnia przedmiotów po tym procesie praktycznie powinna być wolna od naprężeń będących wynikiem obróbki. Ma więc szczególnie korzystne własności eksploatacyjne. Jednak znaczny koszt obróbki ECM, którego głównym składnikiem jest koszt energii elektrycznej powoduje, że zaliczona jest ona do tzw. technologii specjalnych, stosowanych w szczególnych przypadkach. Przykładem może być obróbka tzw. profili lotniczych (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Łopatkę wirnika sprężarki (a), wirnik z łopatkami (b) oraz schemat ECM profili lotniczych

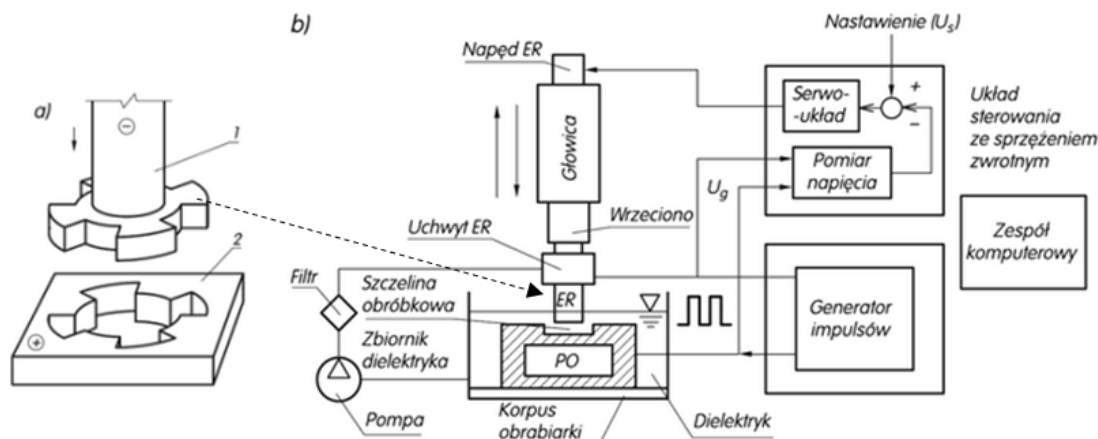
Źródło: L. Dąbrowski, R. Keller, J. Tomczak, *Przykłady innowacyjnego wykorzystania precyzyjnych obrabiarek ECM*, „Inżynieria Maszyn” 2011, 16(4).

Obróbka elektrochemiczna znajduje również zastosowanie w medycynie, głównie w produkcji implantów. Wynika to z konieczności zastosowania trudno skrawalnych materiałów, z których wykonany jest implant (chodzi głównie o materiały odporne na korozję), a także o konieczność uzyskania jego ekstremalnych dokładności.

3.2.2.2. Obróbka elektroerozyjne – EDM

Obróbka elektroerozyjna EDM (*Electro Discharge Machining*) jest procesem, w którym usuwanie materiału następuje wskutek termicznego działania **wyładowania elektrycznego**. Wyładowania te powstają między elektrodami oddzielonymi warstwą dielektryka¹⁴ w chwili, gdy natężenie pola elektrycznego między obydwoma elektrodami osiągnie dostatecznie dużą wartość. Wyładowanie powoduje miejscowe nagrzanie mikroobjętości materiału obrabianego. Ilość doprowadzonego ciepła jest tak duża, że powoduje topienie i parowanie materiału, rezultatem czego jest ubytek materiału – na powierzchni przedmiotu obrabianego powstaje tzw. krater.

Stosowane podczas obróbki napięcie robocze wynosi ok. 30 V, a wydajność obróbki wynosi od 100 do 400 mm³/min. Obróbka elektroerozyjna stosowana jest przede wszystkim w przypadku: **drażenia elektroerozyjnego** oraz **wycinania elektroerozyjnego** (tzw. wycinania drutem). W pierwszym przypadku kształt obrabianego przedmiotu jest odwzorowany (jest negatywem) kształtu elektrody roboczej (czyli narzędzia zwanego erodą), skorygowanym o grubość szczeliny roboczej (rys. 3.16).



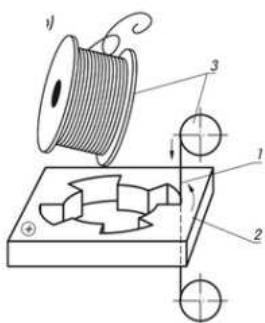
Rys. 3.16. a) Schemat drażenia elektroerozyjnego: 1 – narzędzie (eroda),
2 – przedmiot obrabiany, b) schemat drażarki elektroerozyjnej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

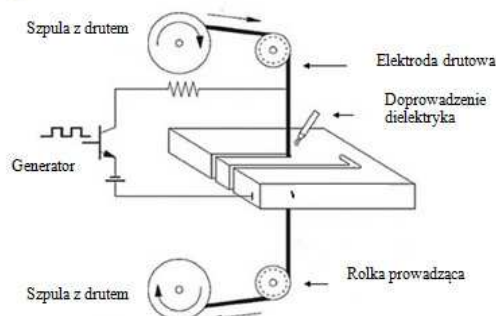
Wycinanie elektroerozyjne WEDM (*Wire Electro-Discharge Machining*) – dokonywane jest przy pomocy drutu o średnicy od 0,02 do 0,2 mm przewijającego się z jednej szpuli na drugą. Wyładowanie elektryczne powstaje między drutem a przedmiotem obrabianym. Wycinany kształt jest rezultatem sterowanego numerycznie przemieszczania stołu obrabiarki, na którym zamocowano obrabiany przedmiot (rys. 3.17).

¹⁴ Podczas obróbki elektroerozyjnej stosowany jest **dielektryk** nieprzewodzący prądu elektrycznego (np. olej). W przypadku obróbki elektrochemicznej stosowany jest **elektrolit**, który jest przewodnikiem prądu elektrycznego.

a)



b)



Rys. 3.17. a) Schemat wycinania elektroerozyjnego – widok przestrzeni roboczej: 1– narzędzie (drut), 2 – przedmiot obrobiony, 3 – szpula z drutem, b) schemat wycinarki elektroerozyjnej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Obróbka elektroerozyjna stosowana jest głównie do wytwarzania elementów o skomplikowanych kształtach, wykonywanych z materiałów trudnoobrabialnych (głównie o wysokiej twardości, lecz przewodzących prąd elektryczny), często niemożliwych do wykonania przy pomocy klasycznych procesów obróbki skrawaniem. Jej podstawowy obszar stosowania to produkcja narzędzi - głównie do oprzyrządowania procesów obróbki plastycznej (matryce), procesów odlewania (formy metalowe) bądź też oprzyrządowania procesów części wytwarzanych z tworzyw sztucznych (formy wtryskowe).

3.2.2.3. Obróbka strumieniowo-erozyjna

Obróbka strumieniowo-erozyjna jest procesem, w którym energia niezbędna do erodowania (usuwania) materiału, dostarczona jest bezpośrednio do atomów i cząsteczek obrabianego przedmiotu. Energia ta dostarczona jest przez strumień, czyli ukierunkowaną wiązkę drobnych cząsteczek takich jak fotony, elektrony, jony itp. Najpowszechniej w przedsiębiorstwach stosowana jest:

- obróbka fotonowa (laserowa) – energia dostarczana jest przez wiązkę fotonów,
- obróbka elektronowa – energia dostarczana jest przez wiązkę elektronów.

Rola tych obróbek nieustannie wzrasta. Wynika to z obserwowanej tendencji do zmniejszenia wymiarów produkowanych części (mikroobróbka), przy jednoczesnej możliwości osiągnięcia coraz większych dokładności operacji obróbkowych wchodzących w zakres **nanotechnologii**¹⁵.

W przypadku **procesu obróbki laserowej** źródłem ciepła jest energia kinetyczna strumienia fotonów. Oddziałując na powierzchnię obrabianą, powoduje wydzielanie się znacznej ilości ciepła, czego wynikiem jest wzrost temperatury w strefie oddziaływania strumienia fotonów. Skutkuje to, podobnie jak podczas obróbki elektroerozyjnej, powstaniem krateru będącego wynikiem roztopienia i wyparowania mikroobjętości materiału w obszarze oddziaływania wiązki fotonów.

Źródłem strumienia fotonów jest laser. Nazwa jest akronimem od *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, czyli wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję

¹⁵ Nanotechnologia jest to termin używany do określenia technik wytwarzania, które umożliwiają obróbkę z dokładnością rzędu 1 nm (1 nm = 0,001µm = 10⁻⁹ m). Nanotechnologię nazywa się również technologią ekstremalną, ponieważ teoretyczną dokładnością graniczną obróbki jest rozmiar atomu lub cząsteczki danego materiału, przy czym odległość między płaszczyznami atomowymi, określającymi rozmieszczenie atomów w ciele stałym, kształtuje się na poziomie 0,2 do 0,4 nm.

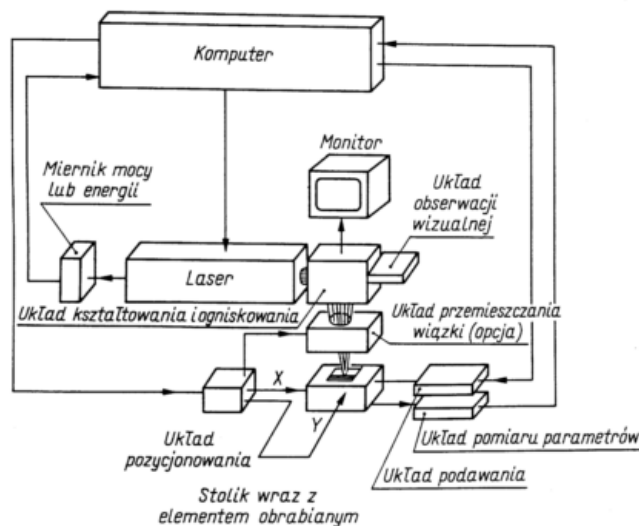
promieniowania. Światło laserowe jest wysoce monochromatyczne (praktycznie o jednej długości fali) i koherentne (spójne). Promień światła laserowego rozchodzi się kierunkowo z bardzo małą rozbieżnością, umożliwia więc wysoką koncentrację energii w określonym miejscu przedmiotu obrabianego.

Procesy obróbki laserowej najczęściej stosowane są w przypadkach:

- cięcia i wycinania przede wszystkim blach i płaskowników – cięcie laserowe wykonywane jest najczęściej w obecności gazu ochronnego takiego jak przykładowo azot lub argon bądź też sprężonego powietrza; jego zadaniem jest przede wszystkim wydmuchiwanie materiału stopionego podczas cięcia, co zwiększa wydajność tego procesu. Laserem o mocy rzędu 10 kW można przecinać płaskowniki o grubości do ok. 50 mm,
- wykonania mikrootworów - pojęciem mikrootworów określa się zazwyczaj otwory o średnicy poniżej 1 mm. Problemem technologicznym w takim przypadku jest możliwość uzyskania odpowiedniej głębokości otworów, a także wymaganej dokładności otworu. Najczęściej średnica mikrootworów wykonywanych laserowo zawarta jest w granicach 0,02 do 0,8 mm.

Schemat obrabiarki laserowej przedstawiony jest na rys. 3.18.

Kolejnym procesem z grupy obróbek strumieniowo-erozyjnej jest **proces obróbki wiązką elektronów** (obróbka elektronowa). W odróżnieniu od omawianej poprzednio obróbki laserowej, przyczyną usuwania materiału przedmiotu obrabianego jest wiązka elektronów. Energia kinetyczna strumienia elektronów podczas zetknięcia się z przeszkodą, jaką jest materiał obrabiany, zamieniana zostaje na ciepło. Na skutek tego następuje w bardzo krótkim czasie gwałtowny wzrost temperatury przekraczający temperaturę topnienia nawet najtrudniej topliwych materiałów. W wyniku tych procesów w miejscu napromieniowania strumieniem elektronów materiał gwałtownie odparowuje. Na powierzchni materiału pojawia się ubytek materiału – krater.

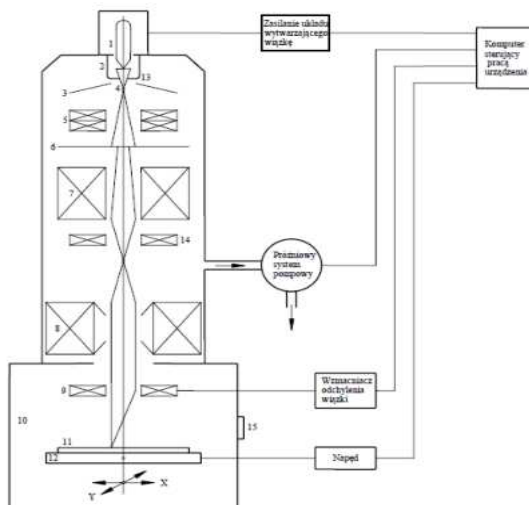


Rys. 3.18. Schemat obrabiarki laserowej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Źródłem elektronów jest katoda. Po podgrzaniu zaczyna emitować elektrony, które następnie są rozpędzane w polu magnetycznym. Strumień elektronów jest przez system sterujący (przyciągający lub odpychający strumień elektronów) kierowany na odpowiednie miejsce przedmiotu obrabianego. Elektrony poruszając się na drodze między katodą, a przedmiotem obrabianym mogłyby zderzać się z cząsteczkami powietrza. Tym samym

mniejsza byłaby ich energia kinetyczna. W skrajnym przypadku uniemożliwiłoby to obróbkę materiału. Z tego względu proces musi odbywać się w próżni (rys. 3.19).



Rys. 3.19. Schemat obrabiarki elektronowej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Najważniejszym obszarem zastosowania tej obróbki jest wykonywanie mikrootworów o średnicach od 40 μm do 200 μm , a także spawanie elektronowe. **Spawaniem elektronowym** nazywa się proces łączenia materiałów przez bombardowanie styku łączonych przedmiotów wiązką elektronową o dużej gęstości energii. Prawie natychmiastowa zamiana energii kinetycznej elektronów na ciepło w miejscu zderzenia z powierzchnią spawanego przedmiotu, powoduje lokalne stopienie materiału i wytworzenie spoiny (złącza), po ponownym zakrzepnięciu materiału. Wykonywana tą technologią spoina jest bardzo wytrzymała i czysta nienarażona na proces utleniania. Wiązką elektronów można spawać wszystkie materiały spawane tradycyjnymi metodami. Jednak na szczególną uwagę zasługuje fakt możliwości wykorzystania spawania elektronowego w przypadkach łączenia materiałów tzw. trudno spawalnych.

3.2.2.4. Obróbka hybrydowa

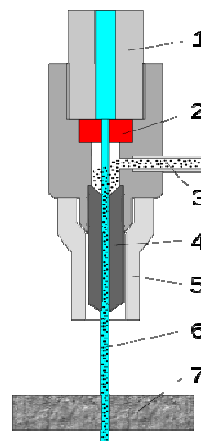
Obróbka hybrydowa jest nowoczesną techniką obróbki ubytkowej materiałów, która polega na połączeniu dwóch lub więcej różnych metod obróbki w jednym procesie. Najczęściej łączy metody obróbki skrawaniem z różnymi metodami obróbki erozyjnej. Głównym celem tej obróbki jest przyspieszenie procesu, a więc zwiększenie jego wydajności, przy zachowaniu wymaganej jakości i dokładności wytwarzanej części.

Przykładem obróbki hybrydowej może być toczenie z podgrzewaniem warstwy skrawanej strumieniem fotonów (rys. 3.20a). Podgrzanie warstwy skrawanej materiału obrabianego, zmniejsza jej twardość, a to zmniejsza siły skrawania i zmniejsza zużycie narzędzia skrawającego.

a)



b)



Rys. 3.20. Schemat obróbki hybrydowej

Źródło: E. Pająk, *Obróbka ubytkowa*.

Innym przykładem jest obróbka strumieniem wody, ze wspomaganie tego strumienia ziarnem ściernym. W ten sposób erozja strumieniem wody zostaje „wzmocniona” oddziaływaniem ziaren ściernych na materiał obrabiany. Jeszcze innym przykładem może być szlifowanie elektrochemiczne. W tym przypadku proces obróbki elektrochemicznej wspomagany jest działaniem ziaren ściernych, zgodnie z zasadami obróbki ścierniej.

Jednakże w każdym przypadku obróbki hybrydowej konieczny jest kompromis. Przykładowo podgrzewanie strefy skrawania podczas toczenia nie może być zbyt intensywne, gdyż wówczas doprowadzone przez strumień lasera ciepło może spowodować pogorszenie właściwości materiału obrabianego i tym samym ograniczenie wytrzymałości wykonywanej części maszyny. Podobnie w przypadku szlifowania elektrochemicznego. Roztworzenie elektrochemiczne wspomagane obróbką ścierną zwiększa wydajność procesu, lecz pogarsza jakość wytwarzanego elementu – ziarna ścierne wprowadzają do wyrobu naprężenia wewnętrzne.



Aleksandra Pertek-Owsianna

Rozdział 4. Tworzywa sztuczne i kompozyty

4.1. Wprowadzenie

Do podstawowych grup materiałów inżynierskich zalicza się metale i ich stopy, polimery i ceramikę. Tworzywa sztuczne są to polimery zawierające składniki dodatkowe nadające tworzywom pożądane właściwości użytkowe lub obniżające koszty ich produkcji np. napelniacze, zmiękczacze, środki smarujące. Kompozyty tworzone są przez połączenie dwóch materiałów inżynierskich (metali, polimerów, ceramiki) w jedną całość, co zapewnia uzyskanie innych właściwości od typowych dla każdego z materiałów składowych.

Głównym kryterium doboru materiałów jest jego przeznaczenie i warunki pracy gotowego wyrobu. Ponadto materiał musi posiadać wymagane właściwości fizyko-chemiczne i mechaniczne. W celu nadania właściwości należy go poddać określonej procesowi technologicznemu. Istnieje ścisła współzależność między właściwościami związanymi ze strukturą materiału a procesem wytwarzania tego materiału. Materiał i technologia muszą także spełniać kryteria ekonomiczne i ekologiczne. Materiały z różnych grup stosuje się zamiennie uwzględniając w/w kryteria ich doboru.

Współczesnym problemem jest recykling tworzyw sztucznych i kompozytów, gdyż produkcja tych materiałów na świecie i w kraju osiągnęła znaczne rozmiary i jest zagrożeniem dla środowiska. Analizą oddziaływania działalności człowieka na problemy ekologiczne środowiska zajmuje się technika analizy cyklu życia LCA mająca na celu identyfikację, kwantyfikację i ocenę efektów, jaki dany wyrób wywiera na środowisko oraz na ustalenie sposobów poprawy jakości środowiska. Problemy te są przedmiotem rozważań w podręczniku: Z. Kowalski, J. Kulczycka, M. Góralczyk, *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.

Tematyka polimerów, tworzyw sztucznych i kompozytów, ich właściwości, wytwarzania i zastosowania w technice i życiu codziennym przedstawiona jest w wielu podręcznikach, artykułach i na stronach internetowych. Najnowszą wiedzę z ostatnich lat z zakresu chemii polimerów i ich zastosowania Czytelnik znajdzie w podręczniku: J.F. Rabek, *Polimery i ich zastosowanie interdyscyplinarne*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2020, a metod recyklingu polimerów i kompozytów w pracy: D. Czarnecka-Komorowska, *Przetwórstwo tworzyw i kompozytów polimerowych w obiegu zamkniętym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2023.

W 2021 r. produkcja tworzyw sztucznych z surowców pierwotnych, pochodzących z recyklingu oraz biomateriałów wynosiła w Europie około 60 mln ton. W tej produkcji udział poszczególnych materiałów polimerowych jest następujący: polipropylen (PP) – 16,6%, polietylen (PE) – 24%, polichlorek winylu (PVC)-14%. Tworzywa produkowane z recyklingu stanowią około 10%, a z biosurowców około 2%. Zastosowanie tworzyw polimerowych w Europie i na świecie głównie dotyczy: opakowań – około 40%, budownictwa – około 20%, artykułów gospodarstwa domowego i sportowego – około 6%.

Tematyka wytwarzania dóbr materiałowych i ich właściwości w aspekcie ochrony środowiska jest przedstawiona w wielu podręcznikach autorstwa: Ashby i współpracowników. W tych publikacjach w sposób wyczerpujący są przedstawiane problemy produkcji wyrobów z różnych grup materiałów, technologii ich wytwarzania, struktur, właściwości i zastosowania o charakterze globalnym, przy czym technologie wyrobów z polimerów i kompozytów są porównywane z innymi technologiami i grupami materiałowymi. Podręczniki te w sposób chronologiczny ujmują omawianą problematykę z uwzględnieniem postępu w tym zakresie



wynikającego z nowych osiągnięć naukowych, ochrony środowiska i zaleceń norm europejskich.

Surowcem do wytwarzania polimerów jest ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel. W tej technologii łączenie monomerów w makrocząstki w kształcie łańcuchów następuje podczas polimeryzacji. Polimery produkują się najczęściej przez wytłaczanie lub wtryskiwanie, a także termoformowanie, kalandrowanie, rozdmuchiwanie, odlewanie, wyciskanie.

Kompozyty o osnowie polimerowej wytwarza się w zależności od rodzaju materiału osnowy oraz fazy, udziału oraz postaci fazy (włókna, cząstki) umacniającej. Mogą to być metody wtrysku i wytłaczania, odlewania, prasowania i spiekania. Kompozyty umacniane cząstkami wytwarza się metodami stosowanymi w metalurgii proszków, a więc przez prasowanie i spiekanie. Natomiast do wytwarzania kompozytów włóknistych stosuje się wiele metod, z uwagi na ich różnorodność i szeroki zakres stosowania. Proces wytwarzania kompozytu włóknistego w ciekłej osnowie składa się z etapów: produkcji włókien, układania włókien (otrzymywanie wiązek włókien równoległych) i formowania wyrobu. Większość metod łączenia włókien z ciekłą osnową sprowadza się do umieszczenia włókien w formie i zalania jej lub zanurzenia, względnie zassania osnowy. Procesy z reguły prowadzi się w atmosferze obojętnej w próżni lub gazie obojętnym. Kompozyty pozwalają na otrzymywanie lekkich, mocnych i elastycznych konstrukcji. Mają zastosowanie głównie w lotnictwie i motoryzacji. Są nimi także materiały żarowytrzymałe (np. łopatkę turbin gazowych) oraz narzędzia (np. węgliki spiekane).

4.2. Definicje polimeru, tworzywa sztucznego, polimeryzacji, polikondensacji, poliaddycji, kopolimeryzacji, reakcje polimeryzacji

Polimer jest związkiem wielkocząsteczkowym, zbudowanym z makrocząsteczek organicznych lub nieorganicznych składających się z łańcuchów powtarzających się podstawowych jednostek strukturalnych -merów, otrzymanych podczas polimeryzacji.

Podział polimerów

Polimery dzieli się na naturalne, syntetyczne i półsyntetyczne.

Polimery naturalne wytwarzane są przez organizmy żywe (roślinne i zwierzęce) np.: celuloza (len, drewno), skrobia (ziemniaki, kukurydza), lateks (drzewo kauczukowe), pektyny (skórki owoców cytrusowych, jabłek), kolagen, jedwab, żelatyna, chityna. Polimery otrzymywane syntetycznie z biologicznych surowców (żywice, skrobia, cukry, tłuszcze, białka) nazywa się biopolimerami. Polimery występujące naturalnie mają podstawowe znaczenie dla procesów życiowych jak np.: kwasy rybonukleinowe i dezoksyrybonukleinowe, polipeptydy czy policukry.

Polimery syntetyczne wytwarzane są przez człowieka, będące produktem przemysłu tworzyw sztucznych w aspekcie recyklingu, są największą grupą polimerów w życiu codziennym i przemyśle np.: polietylen, polipropylen, polistyren, polichlorek winylu, poliamid.

Polimery syntetyczne są materiałami organicznymi, tworzone są przez węgiel, wodór i inne pierwiastki niemetaliczne (N, O, F, Cl, Si, S). Polimer jest to organiczny związek wielkocząsteczkowy składający się z wielu mniejszych cząstek – merów. Merem nazywamy powtarzalne występowanie cząstek w postaci ugrupowań atomów, połączonych wiązaniami kowalencyjnymi (atomowymi).

Monomery są to związki małowartościowe, będące surowcem wyjściowym do syntezy polimeru. Monomery możemy podzielić na trzy grupy:

Monomery winylowe – pochodne etylenu, w którym jeden lub więcej atomów wodoru zostało zastąpionych innymi podstawnikami. Cechą charakterystyczną jest występowanie podwójnego wiązania węgiel = węgiel.



Monomery wielofunkcyjne – zawierają dwa wiązania podwójne lub co najmniej dwie grupy funkcyjne.

Monomery cykliczne z heteroatomami. W przeciwieństwie do liniowych polimerów, polimery cykliczne mają strukturę podobną do pierścienia, w której grupy końcowe łańcucha nie występują.

Do podstawowych własności polimerów należą: mała gęstość, izolacyjne własności cieplne i elektryczne, słabo odbijają światło i zwykle są przezroczyste, w większości są giętkie i odkształcalne, nie nadają się do pracy w podwyższonej temperaturze. W tabeli 4.1 przedstawiono wybrane polimery, w której podane są ich nazwy i symbole literowe.

Tabela 4.1. Międzynarodowe symbole wybranych związków wielkocząsteczkowych wg zaleceń IUPAC (Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej)

Nazwa polimeru	Symbol literowy	Nazwa polimeru	Symbol literowy
poliamid	PA	żywica epoksydowa	EP
poliwęglan	PC	żywica fenolowo-formaldehydowa	PF
polietylen	PE	żywica silikonowa	SR
polipropylen	PP	żywica mocznikowa	U
polistyren	PS	kauczuk naturalny	NR
poli(chlorek winylu)	PVC	kauczuk butadienowy	BR
politetrafluoroetylen (teflon)	PTFE	kauczuk butadienowo-styrenowy	SBR
poli(metakrylan metylu)	PMMA	kauczuk butylowy	IIR
polilaktyd (tworzywo biodegradowalne)	PLA	kauczuk chloroprenowy	CR

Źródło: Opracowanie na podst.: J.F. Rabek, *Polimery i ich zastosowanie interdyscyplinarne*, t. 1 i 2, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2020.

4.2.1. Tworzywa sztuczne

Tworzywa sztuczne są to polimery zawierające składniki dodatkowe nadające tworzywom pożądane właściwości użytkowe lub obniżające koszty ich produkcji, do których zalicza się: **napelniacze** - są dodawane w celu zwiększenia wytrzymałości polimerów głównie przez ograniczenie zdolności do przemieszczeń cząsteczek liniowych. Zwiększają one również stabilność wymiarową i obniżają koszt wytwarzania wyrobów (krótkowłóknista celuloza, skrawki tkanin, krzemionka, mika, proszki metali i sadza),

- **zmiękczacze** – są dodawane w celu obniżenia temperatury zeszklenia, a przez to zwiększenia plastyczności polimeru w określonym przedziale temperatury (estry kwasów dwu- i trójkarboksylowych),
- **stabilizatory** – zapobiegają rozkładowi polimeru pod wpływem utleniania, promieniowania nadfioletowego lub podwyższonej temperatury (związki ołowiowe, wapniowe, cynowe, sadza).
- **środki smarujące** – są dodawane w celu ułatwienia przetwórstwa polimerów – ich zadaniem jest zmniejszenie lepkości polimeru podczas formowania i zmniejszenie



przyczepności polimeru do gorących powierzchni maszyn przetwórczych (parafiny i woski).

- **środki barwiące** – nadają polimerom żądane zabarwienie (żółcień chromowa, tlenki żelaza, ultramaryna, selenek kadmowy, oranż chromowy, siarczek kadmowy, zieleń chromowa, chromian strontowy),
- **środki zmniejszające palność** – np. chloroparafiny, czterobromobenzen, pięciobromobenzen,
- **porofory** – pozwalają na spienianie tworzyw, np. przy produkcji styropianu (pentan, izopentan).

4.2.2. Polimeryzacja, polikondensacja, poliaddycja, kopolimeryzacja

Polimeryzacja jest procesem łączenia się wielu cząsteczek monomeru, któremu nie towarzyszy wydzielanie małowcząsteczkowych produktów ubocznych. W czasie polimeryzacji następuje połączenie związków małowcząsteczkowych (merów) w makro-cząsteczki o kształcie długich łańcuchów.

Polikondensacja jest procesem stopniowego łączenia się wielu cząsteczek w związek wielkocząsteczkowy z jednoczesnym wydzieleniem prostego związku małowcząsteczkowego jako produktu ubocznego reakcji, np. wody, chlorowodoru, amoniaku.

Poliaddycja ma charakter pośredni między polimeryzacją a polikondensacją. Jest to reakcja przebiegająca w sposób stopniowy, nie następuje też wydzielanie się ubocznych produktów małowcząsteczkowych.

Kopolimeryzacja polega na syntetyzowaniu poprzez wspólną polimeryzację dwóch lub większej liczby różnych monomerów.

Podczas polimeryzacji otrzymuje się np. polietylen, polipropylen, polichlorek winylu, polistyren, polimetakrylan metylu, tworzywa fluorowe. W wyniku polikondensacji wytwarza się fenoplasty, aminoplasty, poliamidy, poliwęglany, poliestry, silikon. Poliaddycja pozwala na otrzymanie np. żywic epoksydowych, poliuretanów. W czasie kopolimeryzacji wytwarza się np.: na bazie styrenu - akrylonitryl-butadien-styren (ABS), stosowany głównie w przemyśle motoryzacyjnym i elektronicznym, ceniony za wytrzymałość i odporność na uderzenia, a na bazie etylenu i octanu winylu (EVA), znany ze swojej miękkości i elastyczności podobnej do gumy, stosowany w opakowaniach do żywności oraz jako folia do podłóg laminowanych.

4.2.3. Budowa i struktura polimerów, stopień polimeryzacji i krystaliczności

Zależnie od rodzaju i właściwości reagujących między sobą monomerów otrzymuje się polimery o różnej budowie (rys. 4.1):

- liniowej, tzn. o łańcuchu prostym, np.: polistyren (PS), poli(chlorek winylu) (PVC),
- rozgałęzionej, z licznymi krótkimi rozgałęzieniami bocznymi np.: polietylen o niskiej gęstości PE-LD
- przestrzennie usieciowane, które tworzą przestrzenną ciągłą sieć, tak że nie można w nich wyróżnić pojedynczych cząsteczek, np.: duroplasty (fenoplasty).

Od budowy polimerów zależy między innymi ich zachowanie się w podwyższonej temperaturze. Te dwa ostatnie będą miały wyższą trwałość.

Polimer o budowie liniowej, tzn. o łańcuchu prostym	Polimer o łańcuchu rozgałęzionym	Polimer przestrzennie usieciowany

Rys. 4.1. Budowa polimerów

Stopień polimeryzacji jest liczbą wskazującą liczbę merów znajdujących się w jednej makrocząsteczce i zależy od masy cząsteczkowej monomeru oraz masy powstającej makrocząsteczki. W typowych polimerach stopień polimeryzacji wynosi zwykle od 1000 do 100 000. Wraz ze wzrostem stopnia polimeryzacji rosną właściwości polimeru, jak temperatura zeszklenia i topnienia, lepkość, wytrzymałość, udarność.

Polimery są przede wszystkim ciałami bezpostaciowymi o nieuporządkowanej strukturze. Jednak lokalnie może w nich występować stan uporządkowania i tworzenia struktury krystalicznej. Zdolność polimeru do krystalizacji zależy od chemicznej i geometrycznej budowy makrocząsteczki oraz od wielkości sił międzycząsteczkowych.

W tworzywach wielocząsteczkowych – polimerach występują struktury, przedstawione na rys. 4.2:

- amorficzna (bezpostaciowa), o nieuporządkowanym ułożeniu atomów,
- krystaliczna (uporządkowana),
- częściowo skrytalizowana (semikrystaliczna).

Model polimeru o strukturze bezpostaciowej – amorficznej: termoplasty np. PS, PC	Model polimeru o strukturze amorficzno-krystalicznej (semikrystalicznej) z obszarem krystalicznym i amorficznym: termoplasty np. PA, PE

Rys. 4.2. Struktury polimeru amorficznego i amorficzno-krystalicznego

Stopień krystaliczności polimeru zależy od objętości właściwej materiału całkowicie bezpostaciowego, całkowicie skrytalizowanego w stosunku do objętości właściwej tworzywa. Wraz ze wzrostem stopnia krystaliczności rośnie gęstość, twardość, wytrzymałość, maleje udarność, ścieralność, chłonność wody tworzywa. Do polimerów częściowo krystalicznych zalicza się np. poliamid, poliwęglan.

4.2.4. Reakcje polimeryzacji

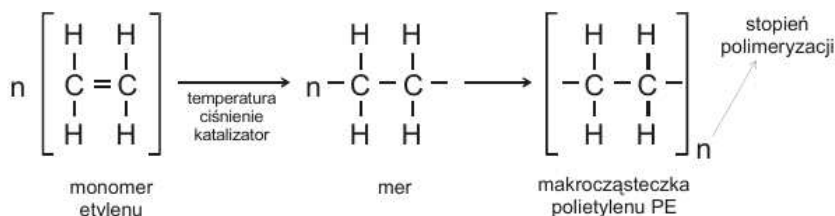
Reakcje chemiczne prowadzące do powstawania polimerów nazywa się reakcjami polimeryzacji.

Polimery mają ten sam skład chemiczny, co monomery, z których powstały, lecz różnią się od nich tylko wielkością cząsteczki. Wzrost łańcucha przebiega na skutek rozerwania wiązań monomeru. Monomerem może być każdy związek chemiczny o niskim ciężarze cząsteczkowym, zwykle węglowodór nienasycony, mający grupy funkcyjne zdolne do reagowania ze sobą: np.: etylen, propylen, chlorek winylu, styren, fenol.

Własnością monomeru umożliwiającą jego połączenie z innymi cząsteczkami podczas polimeryzacji jest obecność wiązań zdolnych do reakcji chemicznej.

Warunkiem są związki co najmniej dwufunkcyjne tj. mające w cząsteczce dwa miejsca reaktywne, prowadzące do powstania polimeru o strukturze liniowej. Istnieją także monomery o funkcyjności większej niż dwa - monomery wielofunkcyjne, prowadzące do powstania polimeru o strukturze rozgałęzionej lub usieciowanej. W odróżnieniu od liniowych polimerów, występują także polimery cykliczne mające strukturę podobną do pierścienia, w której grupy końcowe łańcucha nie występują. Przykłady monomerów oraz wytwarzanych z nich polimerów przedstawione są w tabelach 4.1-4.4.

Na rys. 4.3 pokazano monomer winylowy - etylen, w którym wiązanie podwójne węgiel = węgiel zostało podczas polimeryzacji zastąpione dwoma wiązaniami pojedynczymi w tworzonemu polietylenie.



Rys. 4.3. Reakcja polimeryzacji otrzymywania polietylenu z etylenu

Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

Jeżeli w monomerze etylenu jeden atom wodoru zostanie zastąpiony przez grupę boczną, nazywaną podstawnikiem (R), otrzymuje się monomer asymetryczny. Podstawnikami R mogą być np. Cl (chlor), CH₃ (gr. metyl), C₆H₅ (gr. fenyl), F (fluor). Jeżeli 4 atomy H zastąpione są przez F – powstaje policzterofluoroetylen PTFE (teflon) (tabela 4.2). W ten sposób w wyniku polimeryzacji otrzymuje się odpowiednio: poli(chlorek winylu) PVC, polipropylen PP, polistyren PS, policzterofluoroetylen PTFE (teflon).

Tabela 4.2. Polimeryzacja etylenu z zastosowaniem podstawnika R

Monomer winylowy (pochodny etylenu) z podstawnikiem R			
$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\ & \\ \text{C} & = & \text{C} \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} $
Polimer			
poli(chlorek winylu), PVC	polipropylen, PP	polistyren, PS	policzterofluoroetylen PTFE (teflon)

Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

W tabelach 4.3-4.5 przedstawiono nazwy i wzory wybranych polimerów, otrzymanych z monomerów dwufunkcyjnych i wielofunkcyjnych oraz cyklicznych.



Tabela 4.3. Przykładowe monomery winylowe i otrzymywane polimery

Nazwa i wzór monomeru	Wzór polimeru	Nazwa, akronim
etylen $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$	polietylen PE
propylen $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3) \right]_n$	polipropylen PP
chlorek winylu $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Cl}) \right]_n$	polichlorek winylu PVC
styren $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5) \right]_n$	polistyren PS
tetrafluoroetylen $\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$	$\left[\text{CF}_2-\text{CF}_2 \right]_n$	politetrafluoroetylen, teflon PTFE

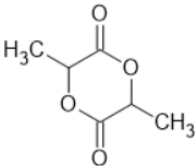
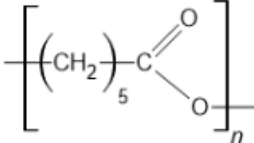
Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

Tabela 4.4. Przykładowe monomery wielofunkcyjne i polimery, które z nich otrzymujemy

Nazwa i wzór monomeru	Wzór polimeru	Nazwa, akronim
kwasy dikarboksylowe i diaminy $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_x-\text{COOH}$ $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_y-\text{NH}_2$	$\left[\text{NH}-(\text{CH}_2)_y-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_x-\text{C}(=\text{O}) \right]_n$	poliamid PA
bisfenol A i fosgen $\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OH}$ $\text{Cl}-\text{C}(=\text{O})-\text{Cl}$	$\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O}) \right]_n$	poliwęglan PC

Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

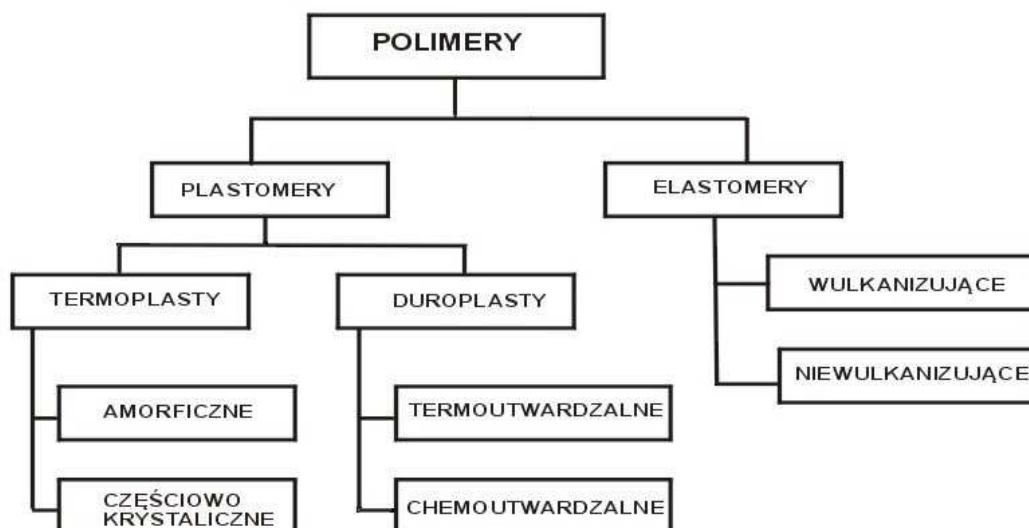
Tabela 4.5. Przykładowe monomery cykliczne i polimery, które z nich otrzymujemy

Nazwa i wzór monomeru	Wzór polimeru	Nazwa/Akronim
laktyd 		polilaktyd PLA

Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

4.3. Podział polimerów

Do podstawowych grup polimerów należą plastomery i elastomery.



Rys. 4.4. Podstawowe grupy polimerów

Źródło: Opracowanie na podstawie stron internetowych.

Plastomery to tworzywa, których wydłużenie w temperaturze pokojowej nie przekracza 100%, dzielą się na:

– **Termoplasty**, które posiadają strukturę liniową lub rozgałęzioną, dlatego podczas ogrzewania przechodzą w stan plastyczny, czyli mięknią i dają się kształtować. Po ochłodzeniu twardnieją zachowując nadane im kształty i odzyskują pierwotne własności. Jest to proces odwracalny. Polimery te mają przeważnie strukturę amorficzną, ale w niektórych (np. PA, PP) występuje struktura częściowo krystaliczna (semikrystaliczna).

– **Duroplasty**, których utwardzenie następuje w wyniku powstawania wiązań sieciujących, utwardzone duroplasty są nierozpuszczalne, a po ogrzaniu nie przechodzą w stan ciekły, lecz przy nadmiernym nagrzaniu następuje ich rozkład. Ich ponowne formowanie nie jest możliwe.

Do duroplastów należą tworzywa:

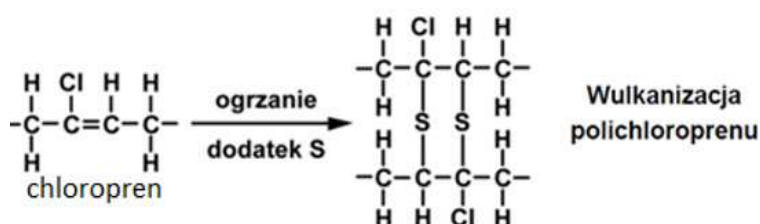
- termoutwardzalne – wiązania sieciujące tworzą się wskutek ogrzewania,
- chemoutwardzalne – utwardzenie ich następuje pod wpływem dodanych środków sieciujących.

– **Elastomery** są zbudowane z długich liniowych, pozwijanych i wzajemnie splątanych cząsteczek, między którymi występują wiązania poprzeczne. Proces sieciowania prowadzący do utworzenia wiązań poprzecznych nazywany jest wulkanizacją. Wiązania poprzeczne w elastomerach spełniają rolę „pamięci kształtu”, a więc po usunięciu obciążenia materiał wraca do pierwotnego kształtu.

Sieciowanie jest to tworzenie poprzecznych wiązań wewnątrzcząsteczkowych między sąsiednimi makrocząsteczkami. Najbardziej znanymi przykładami struktur z wiązaniami poprzecznymi są gumy, w których do utworzenia tych wiązań stosuje się siarkę. Występuje tam:

- wulkanizacja (wiązanie kowalencyjne sąsiednich makrocząsteczek w miejscu wiązań nienasyconych),
- utwardzanie (w przypadku produktów wstępnej polikondensacji lub poliaddycji – polega na zwiększeniu wiązań między sąsiednimi cząsteczkami).

Elastomery wulkanizujące to kauczuki, guma, ebonit.



Rys. 4.5. Przykład reakcji wulkanizacji chloroprenu z otrzymywaniem polichloroprenu

Źródło: Opracowanie na podstawie <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

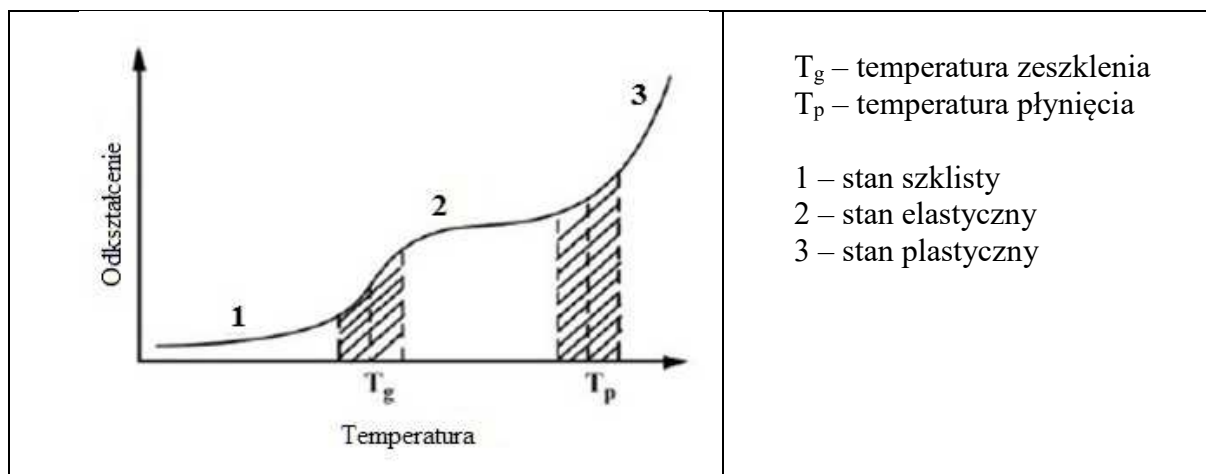
W wyniku procesu sieciowania rosną wytrzymałość, odporność na ścieranie, zmęczenie i odporność cieplna, a maleje odkształcalność trwała oraz rozpuszczalność materiału.

Elastomery niewulkanizujące to tworzywa z makrocząsteczkami liniowymi lub rozgałęzionymi, niepodlegające procesowi wulkanizacji. Najbardziej znanymi są polichlorek winylu zmięczony (PVC) zwany igelitem, stosowany na wykładziny podłogowe, rury, kable, uszczelki, tkaniny oraz kopolimer etylenu i propylenu na wstęgi transporterów, rury gazowe, wysokonapięciowe kable, uszczelki.

4.4. Stan fizyczny polimerów a właściwości

W polimerach występują następujące stany fizyczne: szklisty, wysokoplastyczny (lepkosprężysty) i płynny. Przejście z jednego stanu w drugi zachodzi w pewnym zakresie temperatur (rys. 4.6). Dla porównania np. w metalach występują trzy stany fizyczne: stały, ciekły i gazowy, przy czym przejście jednego stanu do drugiego odbywa się w ściśle określonej temperaturze. Ze względu na wielkość cząstek polimery nie występują w stanie pary, a pod wpływem ogrzewania do zbyt wysokich temperatur ulegają rozkładowi cieplnemu – depolimeryzacji, degradacji i destrukcji.

Na rys. 4.6. przedstawiono charakterystyczne temperatury i stany fizyczne dla polimerów termoplastycznych o strukturze amorficznej.



Rys. 4.6. Stany fizyczne polimeru w zależności od odkształcenia i temperatury

Źródło: Opracowanie na podstawie: <https://epodreczniki.openagh.edu.pl>

W polimerach o strukturze amorficznej występują następujące stany:

- od szklistego do stanu wysokoelastycznego następującego w temperaturze zeszklenia T_g ,
- od wysokoelastycznego do płynnego w temperaturze płynięcia T_p .

Stan szklisty charakteryzuje nieuporządkowanie makrocząsteczek, ale jednocześnie twardość i kruchość wynikająca z tego, że jest przechłodzoną cieczą jak szkło.

W stanie elastycznym pod wpływem przyłożonej siły polimer się odkształca, ale po pewnym czasie powraca do pierwotnego kształtu. W stanie plastycznym w wyniku przyłożonej siły polimer trwale się odkształca. Polimery o strukturze krystalicznej przechodzą bezpośrednio ze stanu szklistego w stan płynny w temperaturze topnienia T_m . Duroplasty na skutek gęstego usieciowania łańcuchów występują wyłącznie w stanie szklistym, po czym ulegają rozkładowi w temperaturze rozkładu T_r . Elastomery (usieciowane) mogą występować tylko w stanie szklistym i wysokoelastycznym, po czym ulegają rozkładowi.

4.5. Charakterystyka wybranych materiałów polimerowych

4.5.1. Tworzywa termoplastyczne

Do polimerów termoplastycznych zalicza się m.in.: polistyren, polietylen, polichlorek winylu, polipropylen, policzterofluoroetylen, poliamid, poliwęglan, poli(metakrylan etylu).

Tabela 4.6. Właściwości fizyko-chemiczne polimerów termoplastycznych

Lp	Właściwości	Polimer termoplastyczny						
		PE	PP	PVC	PS	PA	PC	PLA
1	Gęstość [kg/m ³]	950	900	1400	1000	1100	1200	1300
2	Temperatura zeszklenia [°C]	-110	-20	84	95	54	150	56
3	Pojemność cieplna [J/kg·K]	1800	1900	1000	1200	1500	1200	1200

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment. Eco-informed material choice*, Elsevier Inc., 2021.



Z tabeli 4.6 wynika, że gęstość polimerów termoplastycznych jest najmniejsza w porównaniu z innymi grupami materiałów – metali i ceramiki. Mają dużą pojemność cieplną, znacznie większą od innych materiałów. Natomiast różną się między sobą temperaturami zeszklenia, niektóre z nich mają ujemne wartości, jak PE, PP.

POLIETYLEN PE

Polietylen otrzymuje się w procesie polimeryzacji etylenu. Zależnie od masy cząsteczkowej rozróżnia się polietylen miękki (wysokociśnieniowy) i polietylen twardy (niskociśnieniowy).

Wytwarza się:

PE-HD (high density PE) - polietylen o dużej gęstości. Otrzymywany przez polimeryzację niskociśnieniową. Jest twardszy w porównaniu z PE-LD, ma wyższą wytrzymałość mechaniczną, wyższą temperaturę topnienia, kolor mleczny.

PE-LD (low density PE) - polietylen niskiej gęstości - jest przezroczysty, giętki i miękki, zachowuje elastyczność w niskiej temperaturze (nawet do -60°C).

Właściwości PE

Zalety:

- doskonałe właściwości dielektryczne
- duża odporność na działanie kwasów, zasad, soli i większości związków organicznych
- brak zapachu, smaku
- w dotyku woskowaty o mlecznej barwie.

Wady:

- źle przyjmuje druk,
- źle się klei.

Zastosowanie PE

Tworzywo jest szeroko stosowane we wszystkich dziedzinach techniki, np. w budownictwie, przemyśle chemicznym, w przemyśle spożywczym, na opakowania.

Wykorzystuje się do produkcji: folii, opakowań, pojemników, butelek, rur na wodę pitną i do kanalizacji, do wyrobu artykułów gospodarstwa domowego.

POLIPROPYLEN PP

Polipropylen otrzymuje się w procesie polimeryzacji propylenu.

Właściwości PP

Zalety:

- dobre właściwości termiczne
- duży stopień krystaliczności tworzywa, który wpływa na jego duże właściwości mechaniczne, jak twardość, wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, udarność
- dobra stabilność w odniesieniu do promieniowania UV oraz większości roztworów wodnych.

Wady:

- w czystej postaci jest łatwopalny i rozkłada się w świetle słonecznym.

Zastosowanie PP

Do produkcji artykułów technicznych np., liny, rurociągi, narzędzia, armatura, samochodowe kanały powietrzne i zderzaki, izolacje kabli, przedmioty gospodarstwa domowego.

POLISTYREN PS

Polistyren otrzymuje się na drodze polimeryzacji styrenu, który jest uzyskiwany z benzenu i etylenu. Jest to tworzywo bardzo kruche i po uderzeniu łatwo pęka. Dlatego występuje w odmianach modyfikowanych o lepszych właściwościach, np. S (polistyren niskoudarowy), K (polistyren wysokoudarowy jako mieszanina homogeniczna PS z kauczukami syntetycznymi), G (polistyren wysokoudarowy).

Właściwości PS

Zalety:

- przezroczysty o dużym połysku powierzchniowym
- twardy i kruchy o bardzo ograniczonej elastyczności
- niewielka ścieralność i wodochłonność
- duża stabilność wymiarów
- dobre właściwości elektryczne i dielektryczne
- odporny na ługi oraz na nieutleniające kwasy
- rozpuszcza się m.in. pod wpływem benzyny i dwusiarczku węgla
- łatwo daje się barwić.

Wady:

- łatwopalność, pali się żółtopomarańczowym, kopczącym płomieniem
- skłonność do powstawania pęknięć naprężeniowych
- niska wytrzymałość cieplna.

Zastosowanie PS

- opakowania żywności, leków i kosmetyków, kubki, tacki, pojemniki, pudełka na płyty CD/DVD
- folie izolacyjne, izolacje elektryczne, izolacje cieplne (styropian)
- rury i profile, kształtki, obudowy telewizorów, telefonów, elementy urządzeń AGD,
- zabawki, galanteria, ozdoby, klosze lamp, kasetony,
- tablice rozdzielcze, układy wentylacyjne, podsufitki
- w produkcji szkła syntetycznego o dużej odporności na uszkodzenia mechaniczne.

obudowy długopisów z PS	opakowanie z PE	pojemniki do gospodarstwa domowego z PP	hełm ochronny z PC

Rys. 4.7. Przykłady wyrobów z materiałów polimerowych

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment. Eco-informed material choice*, Elsevier Inc., 2009.

POLICHLOREK WINYLU PVC

Polichlorek winylu jest najstarszym tworzywem termoplastycznym wytwarzanym w skali przemysłowej. PVC otrzymuje się z acetyleny i chlorowodoru.

Odmiany:

- twarda: winidur (do 5% zmiękczaczy)
- zmiękczona: igelit (25-40% zmiękczaczy)
- miękka: polwiplast (do 70 % zmiękczaczy)

Właściwości PVC

Zalety:

- duża odporność chemiczna
- dobre właściwości mechaniczne i elektroizolacyjne



- właściwości samogasnące
- łatwo miesza się z plastifikatorami i napelniającami
- łatwo-obrabialny.

Wady:

- mała odporność na działanie światła słonecznego
- duża lepkość w podwyższonej temperaturze
- niewielka udurowienie twardego PVC w niskich temperaturach.

Zastosowanie PVC

We wszystkich gałęziach przemysłu, a głównie w przemyśle chemicznym, budownictwie oraz na opakowania. Z polichlorku winylu wytwarza się takie półprodukty jak: folie, płyty, rury, wyroby kształtowe oraz pasty.

PVC twardy (nieplastyfikowany) wykorzystywany jest w produkcji rur kanalizacyjnych. W przemyśle budowlanym wytwarza się z niego kształtki, profile budowlane oraz meblowe. Idealnie nadaje się on do produkcji pojemników, płyt, dachówek. Polichlorek winylu znajduje swoje zastosowanie w wytwarzaniu butelek, również w przemyśle medycznym tworzy się z niego strzykawki jednorazowe itp. wyroby.

PVC miękczony stosuje się do produkcji m.in.: węży, płyt antykorozyjnych, wykładzin podłogowych i tapicerskich, sztucznej skóry, folii opakowaniowej i technicznej, izolacji przewodów elektrycznych itp.

PVC miękki (plastyfikowany) posiada jeszcze bardziej szerokie zastosowanie np. w przemyśle elektrycznym do izolacji żył kabli, w przemyśle obuwniczym jako spody, w wytwarzaniu produktów stosowanych w medycynie, takich jak dreny, cewniki, worki na krew i płyny.

POLIAMID PA

PA można otrzymywać z wielu substancji wyjściowych, stąd metody wytwarzania są różne. Najczęściej stosowaną metodą syntezy poliamidów jest polimeryzacja kondensacyjna kwasów dikarboksylowych z diaminami – jednoetapowa lub dwuetapowa (z wydzieleniem soli aminy – na ogół związku krystalicznego, łatwego do oczyszczenia). W wyniku poliaddycji laktamów uzyskać można poliamid 6. PA ma dużą ilość fazy krystalicznej (30÷50%), która korzystnie wpływa na właściwości użytkowe tworzywa.

Właściwości

Zalety:

- duża wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, zmęczeniowa, duży moduł sprężystości,
- duża twardość, odporność na ścieranie
- dobre właściwości elektroizolacyjne
- zdolność wchłaniania wody
- zachowanie stabilności wymiarów
- łatwa obrabialność.

Wady:

- całkowicie wysuszony jest kruchy i wrażliwy na uderzenia
- palny przy kontakcie z odkrytym ogniem
- mieszaniny pyłu poliamidowego z powietrzem są wybuchowe.

Zastosowanie PA

- elementy konstrukcyjne w budowie maszyn: koła zębate, panewki łożyskowe, tuleje, rolki, uszczelki, łopatki śrub napędowych i wentylatorów,
- części izolacji elektrycznej,
- materiały impregnacyjne,
- instrumenty medyczne,
- do produkcji włókien syntetycznych typu stylon (nylon), tkanin.



POLIWĘGLAN PC

Poliwęglan otrzymuje się z fosgenu i dianu (bisfenol A), będącego produktem kondensacji acetonu i fenolu.

Właściwości PC

- bardzo dobra wytrzymałość mechaniczna, udarność,
- duża przezroczystość,
- twardość i odporność na ściskanie jest zbliżona do aluminium

Zastosowanie PC

- do produkcji nośników informacji,
- na elementy aparatury sterowniczej,
- elementy zbiorników, pomp, urządzeń elektronicznych, przekaźników,
- artykuły gospodarstwa domowego,
- sprzęt sportowy,
- sprzęt policyjno-wojskowy.

Typowe zastosowania: tarcze i okulary ochronne, soczewki, szyby, obudowa maszyn, obudowy instrumentów, oprawy oświetleniowe, hełmy ochronne, rozdzielnice elektryczne, laminowanie szyb kulkoodpornych, przybory kuchenne i zastawa stołowa, naczynia kuchenne mikrofalowe, komponenty medyczne (sterylizowane).

POLI(TEREFTALAN ETYLENU) PET

PET to polimer z grupy poliestrów stosowany na dużą skalę do produkcji włókien syntetycznych i butelek do napojów bezalkoholowych. Jest poliestrem kwasu tereftalowego (PTA) lub jego estru – dimetylotereftalanu (DMT) i glikolu etylenowego (EG). Jest to związek o budowie liniowej otrzymywany w reakcji polikondensacji. Reakcja jest prowadzona w obecności katalizatora metalicznego, który może pozostawać w finalnym wyrobie, co należy uwzględnić przy ocenie jakości zdrowotnej wyrobów wytwarzanych z jego użyciem.

Właściwości PET

Zalety:

- dobre właściwości mechaniczne, poślizgowe, duża odporność na ścieranie,
- duża stabilność wymiarowa
- łatwość obróbki i polerowania
- odporność chemiczna na słabe kwasy i roztwory zasad, oleje i tłuszcze

Wady:

- niska odporność na gorącą wodę, stężone kwasy i roztwory zasad

Zastosowanie PET

- butelki – napoje, soki owocowe, wody mineralne, oleje jadalne, sosy, syropy
- słoiki – dżemy, owoce suszone, produkty spożywcze suche, sypkie
- tacki – dania gotowe do odgrzewania w kuchenkach mikrofalowych, wyroby cukiernicze i piekarnicze, warzywa, owoce
- folie i folie metalizowane – produkty do gotowania w torebkach, przekąski, orzechy, słodczyce, wyroby cukiernicze trwałe, lody
- próżniowo pakowane przetwory mleczarskie np. sery, przetwory mięsne, a także kawa, ciastka.

POLILAKTYD (PLA)

W ostatnich latach obserwuje się znaczący postęp w produkcji polimerów, które ulegają biodegradacji. Polimery biodegradowalne w środowisku naturalnym ulegają degradacji, a produktami ich rozkładu są związki nietoksyczne, co sprawia, że są one przyjazne dla środowiska naturalnego. Polimery biodegradowalne są zazwyczaj wytwarzane z surowców



naturalnych np. kukurydzy, trzciny cukrowej, ziemniaków, pancerzy skorupiaków, odpadów rolnych itp.

Polilaktyd można otrzymać podczas polimeryzacji z otwarciem pierścienia laktydu lub poprzez polikondensację kwasu mlekowego. Kwas mlekowy powstaje podczas fermentacji węglowodanów takich jak skrobia, celuloza, natomiast bezpośrednia polikondensacja kwasu mlekowego prowadzi do powstania polilaktydu.

Pod względem właściwości PLA podobny jest do polistyrenu PS, a zmodyfikowany posiada właściwości zbliżone do polipropylenu PP i polietylenu PE.

Zastosowanie PLA:

- do produkcji wyrobów używanych w gospodarstwie domowym takich jak: butelki, kubki, naczynia stołowe,
- w sektorze elektrycznym i elektronicznym np. do wytwarzania kabli pokrytych powłoką zawierającą PLA i PCV,
- w obszarze biomedycznym do produkcji rusztowań, aby zapewnić tymczasowe wsparcie konstrukcyjne do mocowania i wzrostu uszkodzonych tkanek,
- do produkcji opakowań leków, nici chirurgicznych, ręczników higienicznych, włókien,
- do wytwarzania kompozytów.

Tabela 4.7. Przykłady zastosowania niektórych polimerów termoplastycznych

Nazwa polimeru	Symbol	Zastosowanie
polietylen	PE	opakowania do produktów spożywczych, rury, węże
polipropylen	PP	opakowania do produktów spożywczych
polistyren	PS	budownictwo, gospodarstwo domowe, produkcja styropianu
polichlorek winylu	PVC	budownictwo - ramy okienne, elementy instalacyjne
poliamid	PA	części maszyn, artykuły techniczne – liny, sznury
poliwęglan	PC	sprzęt wojskowy, sportowy
policzterofluoroetylen, teflon	PTFE	łożyska, uszczelki, wykładziny garnków
politereftalan etylenu,	PET	opakowania do produktów spożywczych
poli(metakrylan etylu)	PMMA	przemysł optyczny
polilaktyd	PLA	opakowania żywności, leków, nici chirurgiczne

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment...* 2009.

4.5.2. Duroplasty

Duroplasty zwane żywicami, charakteryzują się usieciowaną strukturą, tworzącą się pod wpływem:

- - podwyższonej temperatury (tworzywa termoutwardzalne),
- - czynników chemicznych (tworzywa chemoutwardzalne).

Zalety:

- sztywność, stabilność wymiarowa,
- nierozpuszczalność i nietopliwość,
- doskonałe własności elektroizolacyjne.

Wady:

- kruchość (zmniejsza się przez stosowanie napelnaczy i nośników),
- niemożność powtórnego formowania.



Zastosowanie: w postaci mieszanek do tłoczenia (żywica + napelniacz), laminatów, tworzyw piankowych, tworzyw wzmacnianych (np. włóknem szklanym), żywic technicznych, klejów, lakierów itd.

Do najważniejszych duroplastów należą:

- fenoplasty, aminoplasty, żywice poliestrowe, żywice epoksydowe i niektóre żywice silikonowe.

Tabela 4.8. Właściwości fizyko-chemiczne wybranych duroplastów i elastomerów

Nazwa duroplastu, elastomeru	Właściwości		
	gęstość [g/cm ³]	temperatura zeszklenia [°C]	pojemność cieplna [J/kg·K]
Żywica fenolowo-formaldehydowa – bakelit (PF)	1,24 – 1,32	167 – 267	1500
Żywica epoksydowa (EP)	1,11 – 1,40	66,9 – 167	1200
Żywica poliestrowa (UP)	1,04 – 1,40	147 – 207	1500
Kauczuk naturalny (NR)	0,92 – 0,93	-78,2 – -63,2	1900
Kauczuk butylowy (IIR)	0,90 – 0,92	-73,2 – -63,2	1900
Kauczuk chloroprenowy (CR)	1,23 – 1,25	-48,2 – -43,2	2100

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment...*, 2009.

Kauczuki charakteryzuje mniejsza gęstość od żywic, przy ujemnych temperaturach zeszklenia, przy czym obie grupy polimerów mają dużą pojemność cieplną, podobnie jak wszystkie grupy polimerów.

Tworzywa termoutwardzalne

Fenoplasty

Fenoplasty, żywice fenolowo-formaldehdowe są tworzywami termoutwardzalnymi, otrzymywanymi w wyniku polikondensacji fenoli z formaldehydem. Produkt ten był pierwszym syntetycznym związkiem wielkocząsteczkowym o właściwościach użytkowych, nazwany **bakelitem**.

Podział fenoplastów: żywice techniczne do wyrobu tłoczyw, żywice lane (na odlewy), kleje, kity i spoiwa, żywice modyfikowane (do wyrobu lakierów i emalii), żywice impregnacyjne (do wyrobu laminatów), tworzywa piankowe.

Charakterystyka tłoczywa fenolowego:

- dobre własności mechaniczne i termiczne,
- są nieprzezroczyste, o intensywnym ciemnym zabarwieniu,
- są odporne na działanie wody i rozpuszczalników,
- są trudno palne.

W skład tworzyw wchodzi żywice, napelniacze (wpływające na określone własności wyprasek i obniżające ich cenę), barwniki lub pigmenty i środki smarujące, np. mączka drzewna, grafitowa, kredowa, szklane włókno. Własności i zastosowanie poszczególnych tłoczyw wynikają z użytych substancji.

Charakterystyka bakelitu:

- łatwy do formowania,
- stabilny chemicznie,
- dobry izolator,
- wyjątkowo odporny na ciepło i działania chemiczne,
- nadaje się do recyklingu.

Zastosowanie: części elektryczne – gniazda, przełączniki, przekaźniki, złącza: ogólne przemysłowe; smarowane wodą łożyska, wirniki pomp, tłoki i klocki hamulcowe.

Aminoplasty

Aminoplasty, powstające na bazie żywic mocznikowych i melaminowych są tworzywami termoutwardzalnymi, otrzymywanymi w wyniku polikondensacji związków aminowych z formaldehydem.

Stosowane są w postaci tłoczyw, laminatów, tworzyw piankowych, klejów do drewna, wyrobów lakierniczych i żywic technicznych do uszlachetniania w papiernictwie, włókiennictwie i garbarstwie.

Charakterystyka:

- twardość, sztywność,
- odporność na działanie wody i rozpuszczalników,
- bezwonność i bezbarwność,
- odporność cieplna ($100 \div 120^{\circ}\text{C}$),
- możliwość dowolnego barwienia.

Tłoczywa aminowe stosowane są do wyrobu galanterii, zastaw stołowych, armatury elektrotechnicznej, na kształtki elektrotechniczne i części maszyn.

Z żywicy melaminowych produkowane są laminaty na nośniku z włókien szklanych, stosowane na elementy elektroizolacyjne i konstrukcyjne w urządzeniach elektrycznych narażonych na wilgoć.

Z żywicy mocznikowych produkowane są tworzywa piankowe, najczęściej w postaci bloków, charakteryzujące się bardzo małą gęstością ($0,006 \div 0,012 \text{ g/cm}^3$), małą przewodnością cieplną i niepalnością. Są używane jako materiał termoizolacyjny (w chłodnictwie) i dźwiękochłonny.

Elementy instalacyjne z PVC	Koło zębate z PA	Łożysko kulkowe z PP	Rękawice z kauczuku naturalnego NR	Dętka z kauczuku butylowego BR

Rys. 4.8. Przykłady wyrobów z materiałów polimerowych

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment...*, 2009.

TWORZYWA CHEMOUTWARDZALNE

Żywice poliestrowe są tworzywami otrzymywanymi w wyniku polikondensacji mieszaniny nienasyconych i nasyconych kwasów dwukarboksylowych z glikolami. Przed utwardzeniem mają postać gęstego, żółtawego syropu. Utwardzają się po dodaniu inicjatorów, aktywatorów, napelnaczy. Zależnie od budowy wyjściowej żywicy i metody jej utwardzenia końcowy produkt może być elastyczny lub twardy i kruchy.



Zastosowanie: w postaci lanej (do zalewania elementów aparatury elektrotechnicznej i radiowej oraz do konserwacji preparatów biologicznych i medycznych), lakiernicze i do wytwarzania laminatów na nośniku szklanym-

Laminaty poliestrowe zawierają $50 \div 70\%$ wag. włókna szklanego w postaci tkaniny, maty, rzadziej włókna ciętego. Używane są jako materiały konstrukcyjne do budowy łodzi, jachtów, nadwozi samochodowych, w budownictwie (np. ścianki działowe), na zbiorniki do benzyny i chemikaliów itp.

Żywice epoksydowe, zwane powszechnie epidianami są to tworzywa chemoutwardzalne na zimno lub gorąco, w zależności od użytego utwardzacza. Najbardziej rozpowszechnionym typem epoksydów są produkty reakcji epichlorohydryny z dianem w środowisku zasadowym.

Cechy: doskonała przyczepność do wszystkich prawie tworzyw, a zwłaszcza do metali, dobre własności mechaniczne i elektryczne, odporność na działanie czynników atmosferycznych i chemicznych, mała nasiąkliwość wodą.

Zastosowanie: w postaci żywic lanych (elementy urządzeń chemicznych, elementy elektrotechniczne), laminatów na nośniku z włókien szklanych (zbiorniki, łodzie, karoserie samochodowe, elementy szybówców), klejów do metali i lakierów.

Żywice silikonowe, to wielkocząsteczkowe związki krzemu, pośrednie między substancjami organicznymi i nieorganicznymi, o bardzo zróżnicowanych właściwościach (elastyczne, twarde i bardzo twarde). Żywice silikonowe otrzymuje się z piasku kwarcowego, węgla, chloru poprzez czterochlorek krzemu. W handlu spotyka się silikonów w postaci od oleistych cieczy do ciał stałych.

Zastosowanie: w postaci tłoczyw (na kształtki elektroizolacyjne), laminatów na nośniku z włókien szklanych lub azbestowych (elementy transformatorów i maszyn elektrycznych) i lakierów.

4.5.3. Elastomery

Podział elastomerów:

- **Elastomery wulkanizujące** - tworzywa otrzymane w wyniku wulkanizacji np.: kauczuki, guma, ebonit.
- **Elastomery niewulkanizujące**

Tworzywa z makrocząsteczkami liniowymi lub rozgałęzionymi, niepodlegające procesowi wulkanizacji. Najbardziej znanymi są polichlorek winylu zmiękczonej (PVC) zwany popularnie **igelit**, stosowany na wykładziny podłogowe, rury, kable, uszczelki, tkaniny oraz kopolimer etylenu i propylenu na wstęgi transporterów, rury gazowe, wysokonapięciowe kable, uszczelki.

Wulkanizacja jest to proces technologiczny stosowany w celu przekształcenia mieszanki kauczukowej w gumę. Polega na przestrzennym łączeniu makrocząsteczek kauczuku wiązaniami poprzecznymi – sieciowanie. Wulkanizowanie kauczuku prowadzi się przeważnie w temperaturze $140-180^{\circ}\text{C}$, przy udziale środków wulkanizujących (najczęściej siarki) i w obecności przyspieszaczy, pod zwiększonym ciśnieniem.

Podstawowymi składnikami mieszanki kauczukowej są:

1. Kauczuk naturalny lub sztuczny.
2. Substancje wulkanizujące (siarka w ilości ok. $0,5 \div 10\%$ mas.).
3. Dodatki uszlachetniające: przyspieszacze wulkanizujące, zmiękczacze, napelniacze, anty-utleniacze, substancje antyseptyczne i inne.

RODZAJE KAUCZUKU

Kauczuk naturalny NR jest produktem roślinnym, otrzymywanym głównie z lateksu drzew kauczukowych. Zawiera $30 \div 45\%$ substancji stałej, składającej się z około 96% węglowodoru



kauczukowego, reszta to białka, cukry, kwasy tłuszczowe, żywice i in. Kauczuk otrzymuje się w wyniku koagulacji lateksu za pomocą kwasu mrówkowego lub azotowego.

Zastosowanie:

- sprzęt medyczny,
- dętki i opony,
- mocowania antywibracyjne,
- izolacja elektryczna.

Kauczuki syntetyczne są materiałami otrzymywanymi przez polimeryzację związków organicznych, wykazującymi cechy fizyczne kauczuku, ale różniącymi się od niego pod względem chemicznym. Powstają one w wyniku polimeryzacji monomerów, posiadających dwie lub więcej grup reaktywnych, jak butadien, izopren, chloropren i in.

Kauczuki syntetyczne dzielą się na: butadienowe, butadienowo-styrenowe, izoprenowe, butylowe, chloroprenowe, silikonowe itd.

Kauczuk butylowy (BR) to związek syntetyczny przypominający właściwościami naturalną gumę.

Właściwości:

- dobra odporność na ścieranie, rozdarcie, zginanie,
- niska przepuszczalność gazu,
- dobre własności izolacyjne dla zastosowań elektrycznych

Zastosowanie:

- dętki, uszczelki, pasy, mocowania antywibracyjne, elektryczne izolacje, rury, klocki hamulcowe, gumowe rury okładzinowe i pompy.

Guma jest elastycznym produktem wulkanizacji. Jej właściwości zmieniają się w szerokich granicach, w zależności od rodzaju kauczuku, ilości i rodzaju pozostałych składników mieszanki kauczukowej, sposobu jej przygotowania oraz warunków wulkanizacji. Dobierając odpowiednio składniki mieszanki i stosując różne parametry technologiczne, można otrzymywać wiele gatunków gum o bardzo zróżnicowanych własnościach.

Właściwości:

- wytrzymałość na rozciąganie $2 \div 40$ MPa,
- twardość $25 \div 95^\circ$ wg Shore'a,
- odporność na ścieranie, istotna dla wyrobów, jak bieżniki opon, uszczelnienia połączeń ruchomych,
- bardzo dobre własności amortyzacyjne, ważne do wyrobu różnego rodzaju zderzaków i amortyzatorów dla przemysłu motoryzacyjnego, maszynowego,
- odporność na odkształcenia trwałe, z przeznaczeniem na wszelkiego rodzaju uszczelnienia,
- w nafcie i benzynie guma lekko pęcznieje.

Zastosowanie gumy i jej wyrobów:

- ogumienie kół jezdnych,
- części gumowe hydraulicznych układów hamulcowych, jak uszczelki, osłony, przewody,
- pasy pędne tkaninowo-gumowe (płaskie i klinowe),
- węże gumowe (do wody, benzyny i olejów mineralnych, gazów),
- płyty piankowe gumowe,
- elementy gumowo-metalowe, stosowane w przegubach metalowo-gumowych, poduszkach elastycznego zawieszenia silników, amortyzatorach.

Ebonit, jest specjalnym rodzajem gumy, otrzymywanym z kauczuku naturalnego lub niektórych kauczuków syntetycznych, zawierający 20-30% siarki oraz niewielkie ilości zmiękczaczy (oleje, parafina) i napelniaczy (pył ebonitowy, sadza, kreda).

**Właściwości ebonitu:**

- nierozpuszczalny,
- nietopliwy,
- łatwo poddaje się obróbce mechanicznej.
- odporny jest na działanie nafty i benzyny

Zastosowanie ebonitu:

- antykorozyjne wykładziny,
- naczynia akumulatorowe,
- części aparatury chemicznej,
- wyroby elektrotechniczne.

Tabela 4.9. Przykłady zastosowania niektórych duroplastów i elastomerów

Nazwa duroplastu, elastomeru	Symbol	Zastosowanie
Żywica fenolowo-formaldehydowa – bakelit	PF	obudowy silników, wtyczki, gniazdka, laminaty
Żywica epoksydowa	EP	osnowa kompozytów z włóknami szklanymi i węglowymi, laminaty, kleje
Żywica poliestrowa	UP	laminaty, uszczelki rur kanalizacyjnych, łodzie, kabiny ciężarówek, wędkie
Kauczuk naturalny	NR	rękawice, uszczelki, paski, izolacja elektryczna
Kauczuk butylowy	IIR	dętki, mocowania antywibracyjne, rury, klocki hamulcowe
Kauczuk chloroprenowy	CR	uszczelki hamulcowe, membrany, obuwie, pianki do nurkowania

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, *Materials and the environment...*, 2009.

4.5.4. Polimery – depolimeryzacja, degradacja, recykling

Do ważnych współcześnie zagadnień należą procesy recyklingu polimerów.

Depolimeryzacją nazywa się proces, w którym głównym produktem są wyjściowe monomery. Jeśli proces rozkładu polimeru przebiega z wytworzeniem innych produktów nazywa się go degradacją. Recykling jest to proces przetwarzania odpadów przemysłowych i domowych w celu ponownego wprowadzenia do obiegu niektórych materiałów i użycia ich do produkcji nowych produktów.

Nowe kierunki produkcji polimerów polegają na:

- poszukiwaniu nowych tworzyw biodegradowalnych,
- stosowaniu procesów degradacji biologicznej.

Rodzaje degradacji polimeru:

1. Mechaniczna, dotyczy efektów makroskopowych zachodzących w polimerach pod wpływem działania sił rozciągających i innych.
2. Fotochemiczna, zachodząca pod wpływem światła; radiacyjna pod wpływem promieniowania.
3. Chemiczna – oznacza procesy wywoływane czynnikami chemicznymi takimi jak: kwasy, zasady, rozpuszczalniki, reaktywne gazy.



4. Degradacja termiczna (piroliza), zachodzi, gdy polimer pod wpływem temperatury zmienia swoje właściwości chemiczne bez udziału czynników chemicznych. Efektem pirolizy jest rozerwanie wiązań chemicznych C-C w łańcuchu, co objawia się obniżeniem masy cząsteczkowej oraz wydzielaniem produktów gazowych: CO₂, CO, Nox, Cl₂, oraz ciekłych – oleje opałowe i stałych: koks, sadza.

Degradacja polimerów rozpoczyna się w temperaturze 150÷200°C, kończy około 400°C, z wyjątkiem żywic: poliestrowych, fenolowych i mocznikowych.

Niektóre polimery: jak np. polistyren podczas ogrzewania ulegają depolimeryzacji z częściowym odzyskaniem monomeru.

5. Degradacja biologiczna, wywoływana jest działaniem na polimery enzymów, produkowanych przez mikroorganizmy np. bakterie, grzyby. Rozkład polimerów syntetycznych przez mikroorganizmy jest możliwy, ale nie ma mikroorganizmów natychmiast je degradujących.

Na działanie mikroorganizmów wykazują wrażliwość polimery:

- poliestry,
- poliuretany (do 100%),
- poliamidy.

Polimery biodegradowalne

Polimer jest biodegradowalny, jeśli w całości ulega rozkładowi przez bakterie, grzyby w glebie lub w wodzie w ciągu określonego czasu np. 6 m-cy.

Etapy biodegradacji:

1. Rozpad wiązań chemicznych w łańcuchu polimeru, pod wpływem ataku enzymów zgodnie z mechanizmem utleniania lub hydrolizy.
2. Mineralizacja, w wyniku której następuje przemiana polimeru w biomasę, sole, wodę, dwutlenek węgla, metan, azot.

Przykładem polimeru biodegradowalnego jest polilaktyd (PLA), otrzymywany przez fermentację skrobi (np. kukurydza, ziemniaki, buraki).

4.6. Kompozyty

Kompozyty są to tworzywa składające się z dwóch lub więcej faz o własnościach nieosiągalnych w innym materiale. Kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednak z widocznymi granicami między komponentami. Kompozyty dzielimy na umacniane cząstkami i włóknami. Możliwe są różne kombinacje kompozytów np. osnowa polimerowa, metaliczna, ceramiczna, a cząstki lub włókna mogą być metalowe, ceramiczne, polimerowe.

Kompozyty pozwalają na otrzymywanie lekkich, mocnych i elastycznych konstrukcji. Mają zastosowanie głównie w lotnictwie i motoryzacji, a także sporcie. Są nimi także materiały żarowytrzymałe (np. łopatki turbin gazowych) i narzędzia (np. węgliki spiekane).

4.6.1. Klasyfikacja kompozytów

Podział w zależności od pochodzenia:

- kompozyty naturalne (oparte o włókna naturalne np. len, juta, sizal),
- kompozyty syntetyczne zaprojektowane i wytwarzane przez człowieka.

Podział według przeznaczenia:

- kompozyty konstrukcyjne,
- kompozyty o szczególnych właściwościach fizycznych lub chemicznych.

Podział w zależności od rodzaju osnowy:

- kompozyty o osnowie niemetalicznej:

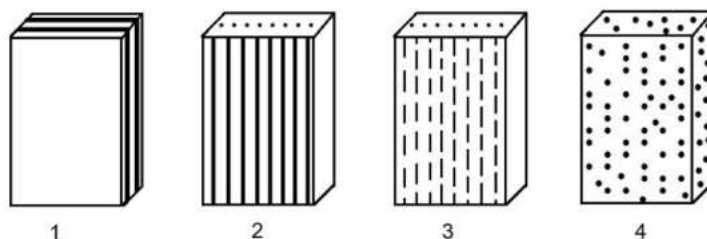
- polimerowej,
- ceramicznej,
- kompozyty o osnowie metalicznej.

Podział uwzględniający wpływ kształtu i wymiarów komponentu umacniającego na mechanikę pracy kompozytów konstrukcyjnych:

- kompozyty umacniane włóknem:
 - ciągłym,
 - krótkim (ciętym),
- wyrobami z włókien (tkaniny, maty),
- kompozyty umocnione cząstkami (ziarnami).

Podział według postaci łączonych materiałów:

- kompozyty warstwowe,
- kompozyty włókniste,
- kompozyty ziarniste (cząstki).



Rys. 4.9. Rodzaje kompozytów w zależności od postaci materiału umacniającego:

1 – warstwowy, 2 – włóknisty (włókno ciągłe), 3 – włóknisty (włókno krótkie), 4 – ziarnisty

Źródło: Opracowanie na podst.: M. Kaczorowski, A. Krzyńska, *Konstrukcyjne metalowe, ceramiczne i kompozytowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2017.

4.6.2. Właściwości kompozytów

Kompozyty konstrukcyjne różnią się rodzajem użytych komponentów, kształtem i wymiarami komponentu umacniającego, technologią wytwarzania itp., przy czym mają jedną wspólną cechę – wysokie wskaźniki mechaniczne.

Od kompozytów oczekuje się małej gęstości, dużej wytrzymałości właściwej (wytrzymałość odniesiona do gęstości), wysokiej temperatury pracy, dobrej ciągliwości związanej z wiązkowością wpływającą na zmniejszanie rozprzestrzeniania pęknięć, niskich kosztów. Właściwości te są wzajemnie uzależnione.

Najczęściej kompozyt składa się z dwóch składników, przy czym jeden z nich o większym udziale pełni rolę osnowy, a drugi – umocnienia (zbrojenia) tej osnowy.

Jednym z kryteriów jest rodzaj osnowy i podział na kompozyty o osnowie:

- polimerowej PMC (*Polimer Matrix Composites*),
- ceramicznej CMC (*Ceramic Matrix Composites*),
- metalowej MMC (*Metal Matrix Composites*).

4.6.3. Materiały stosowane na osnowy kompozytów

Osnową materiałów kompozytowych mogą być metale, ceramika i polimery.

Rolą osnowy jest utrzymanie fazy umacniającej w określonym miejscu w przestrzeni tworzywa oraz deformacja pod wpływem obciążeń, przenosząc naprężenia na składniki fazy zbrojącej.



Osnowa metalowa

Osnowę metalową kompozytów stanowi żelazo i jego stopy, stopy niklu, metale i stopy nieżelazne, głównie aluminium, magnez, miedź, srebro, cyna, ołów, tytan, intermetale (Ni_3Al , NiAl , Ti_3Al , TiAl , MoSi_2) oraz nadstopy.

Osnowa ceramiczna

Do osnowy ceramicznej w materiałach kompozytowych można zaliczyć ceramikę techniczną – głównie Al_2O_3 i azotek krzemu Si_3N_4 , szkła oraz węgiel.

Osnowa polimerowa

Na osnowę kompozytów polimerowych stosuje się:

- żywice termoutwardzalne: fenoplasty i aminoplasty,
- żywice chemoutwardzalne: poliestrowe, epoksydowe i silikonowe,
- tworzywa termoplastyczne: poliamid, polipropylen, polietylen, poliwęgiel

Polimery są tworzywami, które cechują się lekkością i odpornością na korozję oraz w większości nie przewodzą prądu elektrycznego. Wielkością odróżniającą je od innych materiałów konstrukcyjnych np. metali jest mały moduł sprężystości E , np. dla poliamidu PA wynosi 1,4 GPa, a dla stali niskowęglowej – 200 GPa (tabele 4.11 i 4.12). Moduł sztywności maleje także wraz ze wzrostem temperatury użytkowania. Przez dodanie włókien lub cząstek wysokomodułowych podwyższa się sztywność i wytrzymałość na rozciąganie materiału.

Najważniejsze i oczekiwane parametry decydujące o przydatności kompozytów konstrukcyjnych to wzrost wytrzymałości, sztywności, ciągliwości i wiązkości oraz temperatury pracy, przy obniżeniu gęstości, a także zmniejszeniu szybkości rozprzestrzeniania się pęknięć zmęczeniowych.

W produkcji kompozytów zastosowanie znalazły przede wszystkim żywice epoksydowe oraz poliestrowe, ale także polimery termoplastyczne, jak np. polietylen, polipropylen, poliamid. Żywice wiążą włókna wzmacniające, takie jak włókna szklane lub węglowe, zwiększając ogólną wytrzymałość, sztywność i trwałość kompozytu.

W wyrobach o zaawansowanej technologii stosowane są żywice epoksydowe,

Żywice epoksydowe mają większe wartości wydłużenia 8-10%, co chroni osnowę przed pękaniem i umożliwia eksploatację kompozytów przy większych odkształceniach sprężystych. Zmierza się do otrzymywania żywic o podwyższonych wartościach odporności na kruche pękanie K_{Ic} , czyli zwiększonych parametrach wiązkości G_{Ic} otrzymywanych z dodatkiem plastyfikatorów.

Żywice poliestrowe znalazły zastosowanie w skali przemysłowej w produkcji wyrobów o średnich właściwościach mechanicznych, mają one większą wrażliwość na karby zewnętrzne i niską chłonność wody, ale mniejszy koszt wytwarzania od żywicy epoksydowej.

Są odporne na wiele substancji chemicznych i czynników środowiskowych, dzięki czemu nadają się do stosowania w trudnych warunkach. Ta właściwość jest szczególnie cenna w zastosowaniach takich jak środowiska morskie i przemysł chemiczny. Są lekkie, co jest korzystne w zastosowaniach, w których istotne jest zmniejszenie masy, np. w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Ta cecha pomaga poprawić zużycie paliwa i ogólne osiągi. Kompozyty wykonane z poliestru wykazują dobrą odporność na uderzenia i trwałość, dzięki czemu nadają się do zastosowań wymagających wytrzymałości i sprężystości, np. w materiałach budowlanych i towarach konsumenckich.

Znajdują zastosowania w różnych gałęziach przemysłu: w częściach samochodowych, kadłubach łodzi, łopatach turbin wiatrowych, sprzęcie sportowym i materiałach budowlanych.

4.6.4. Materiały stosowane do umocnienia kompozytów

Do umocnienia kompozytów mogą być stosowane praktycznie wszystkie materiały, zarówno naturalne, jak i syntetyczne. Podstawowym celem wprowadzenia włókien do



kompozytów konstrukcyjnych jest uzyskanie podwyższenia wskaźników wytrzymałościowych materiału, który staje się kompozytem, a także jednym z ważniejszych użytkowych kryteriów jest temperatura. W niskiej temperaturze można stosować praktycznie wszystkie materiały łącznie z naturalnymi typu len, konopie, wióry drzewne, powyżej 700°C nadają się tylko włókna ceramiczne i węglowe.

Tabela 4.9. Zakres temperatur użytkowania włókien z różnych materiałów

Zakres temperatur	Rodzaj włókna
Niskie temperatury do (100°C)	organiczne, szklane, węglowe, metaliczne, ceramiczne, boru
Podwyższone temperatury (100-400°C)	niektóre organiczne, szklane węglowe, metaliczne, ceramiczne, boru
Średnie temperatury (400-700°C)	węglowe, ceramiczne, metaliczne
Wysokie temperatury (powyżej 700°C)	węglowe, ceramiczne

Źródło: M. Kaczorowski, A. Krzyńska, *Konstrukcyjne metalowe, ceramiczne i kompozytowe*.

Tabela 4.10. Właściwości wybranych włókien stosowanych do wytwarzania kompozytów polimerowych

Rodzaj włókna	Gęstość [Mg/m ³]	Moduł E [GPa]	Wytrzymałość R _m [MPa]	Temperatura topnienia [°C]	Temperatura pracy [°C]
Szklane (typ E)	2,6	75	2100	700	350
Węglowe (typ HT)	1,74	240	3400	3600	500
Węglowe (typ HM)	1,83	400	2300	3600	600
Ceramiczne Al ₂ O ₃	3,9	400	1500	2000	1000
Polimer PE	0,95	130	3000	140	60

Źródło: Opracowanie na podst.: H. Leda, *Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi. Wytwarzanie. Właściwości. Zastosowanie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2006.

Najważniejszym rodzajem włókien stosowanych do wzmacniania kompozytów są włókna węglowe z powodu lepszych właściwości, wytrzymałości właściwej i najlepszego modułu właściwego. Włókna węglowe występują jako włókna HT o większej wytrzymałości oraz wysokomodulowe (grafitowe) o większym module sprężystości E. Mają one wyższe temperatury topnienia i pracy, wyższą sztywność (moduł E) i wytrzymałość od włókien szklanych. Są także lżejsze od ceramicznych i szklanych. Włókna polimerowe np. z polietylenu mają również dobre właściwości wytrzymałościowe, małą gęstość, ale nadają się do pracy w niskich temperaturach.

4.6.5. Postaci, kształty i wymiary cząstek i włókien stosowanych na kompozyty

W materiałach kompozytowych fazę wzmacniającą stanowią cząstki bądź włókna.

Cząstki są to składniki wzmacniające o w przybliżeniu jednakowych wymiarach we wszystkich kierunkach o kształcie regularnym, sześciennym, sferoidalnym, płytkowym lub nieregularnym, nazywane ziarnami. Są to związki chemiczne typu tlenków (Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂), węglików (SiC, TiC, B₄C, WC), azotków (BN), grafitu. Wielkość stosowanych cząsteczek waha się w granicach od kilku do kilkuset mikrometrów. Udział objętościowy cząsteczek najczęściej od 25% do 60%.

Włókna. Najczęściej stosowanymi materiałami na włókna poza materiałami szklanymi i węglowymi są np. tlenkowe Al₂O₃, węglkowe SiC, B₄C, azotkowe Si₃N₄, borowe, krzemowe.



Także z polimerów wytwarzane są włókna poliamidowe, polietylenowe, aramidowe np. kevlar o dużej wytrzymałości.

Najważniejszym rodzajem włókien stosowanych do wzmacniania kompozytów są włókna węglowe z powodu lepszych właściwości, wytrzymałości właściwej i najlepszego modułu właściwego. Gdy komponenty pełniące rolę wzmocnienia mają postać włókien, to stosunek długości do przekroju może zmieniać się w szerokich granicach. Dlatego wyróżnia się włókna długie i krótkie, rozłożone w sposób przypadkowy lub ukierunkowany.

Elementy wzmacniające mogą mieć postać: monokryształów (wiskersów) o średnicy (1-5 mm), włókien o średnicy poniżej 100 μm i znacznej długości. Przyjmują formę rovingu (formowanie w bardzo cienkie nici, łączone następnie w pasma), tkanin lub mat.

Włókna szklane i węglowe. Głównym składnikiem większości szkieł jest krzemionka (SiO_2) oraz tlenki wapnia, sodu i boru. Szkła mają struktury amorficzne (niekryształiczne) i w miarę obniżania temperatury przechodzą ze stanu ciekłego przez stan cieczy przechłodzonej w stan szklisty. Właściwości włókien szklanych w porównaniu z węglowymi przedstawia tabela 4.10. Włókna szklane mają większą gęstość, a mniejszy moduł sprężystości Younga E i wytrzymałość R_m . Ze względu na mniejszą temperaturę topnienia od włókien węglowych, mogą pracować w niższej temperaturze do 350 $^{\circ}\text{C}$.

Włókna węglowe są szeroko stosowane, pomimo że są droższe od szklanych. Charakteryzują je wyższe parametry wytrzymałościowe, mogą pracować w wyższej temperaturze i środowisku wilgotnym, dlatego zapotrzebowanie na nie wzrasta, a w związku z tym prowadzone są prace badawcze nad nowymi typami włókien i technologii ich otrzymywania. Przykładem są włókna HMS charakteryzujące się dużą wytrzymałością $R_m = 4000 \text{ MPa}$, jak również dużym modułem $E = 550 \text{ GPa}$.

Koncepcja kompozytu konstrukcyjnego sprowadza się do rozmieszczenia w osnowie komponentu wzmacniającego, zwykle sztywniejszego niż osnowa.

Wyróżnić można następujące przypadki umocnienia:

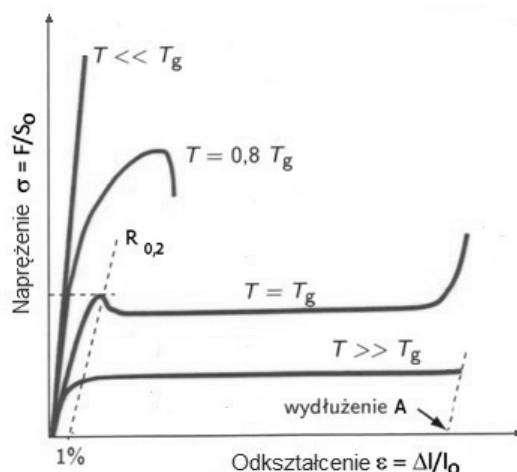
1. Umocnienie dyspersyjne z równomiernie rozmieszczonymi cząstkami o średnicy $0.01 \div 1.0 \text{ mm}$ i udziale objętościowym 1% do 15%. Główny mechanizm umocnienia polega na hamowaniu ruchu dyslokacji.

2. Umocnienie cząstkami o średnicy większej niż 1 mm i udziale objętościowym przekraczającym 25%. Główny mechanizm umocnienia polega na ograniczeniu zdolności osnowy do odkształcenia się.

3. Umocnienie włóknami o średnicy wynoszącej do kilkuset mm i udziale objętościowym od kilku do 70% (a nawet więcej). Rola osnowy sprowadza się do przeniesienia obciążenia na wysoko wytrzymałe włókno.

4.6.6. Właściwości mechaniczne polimeru oraz kompozytu polimer – włókno w próbie rozciągania

Wytrzymałość na rozciąganie dla polimeru określana jest w standardowej próbie wytrzymałościowej. Na rys. 4.10 przedstawiono krzywe zależności naprężenia uzyskane dla różnych temperatur badania, związanych z krytyczną temperaturą występującą w polimerze, jaką jest temperatura zeszklenia T_g . Dla polimerów umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ jest definiowana jako naprężenie, przy którym krzywa rozciągania staje się nieliniowa, co zazwyczaj ma miejsce przy odkształceniu 1%.

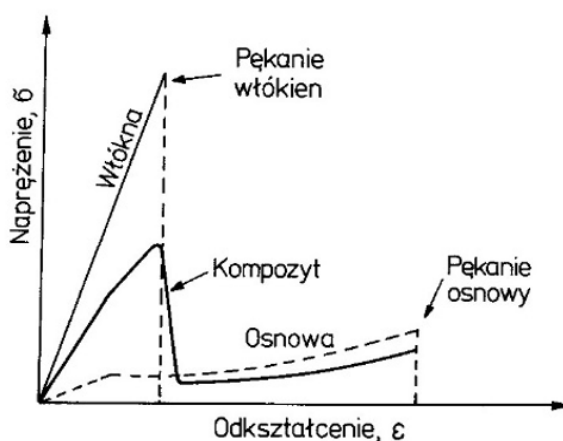


Rys. 4.10. Naprężenie-odkształcenie dla polimeru w zależności od temperatury zeszklenia

Źródło: M.F. Ashby, D.R. Jones, *Materiały inżynierskie, kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, WNT, Warszawa, t. 2, 1996.

Znacznie poniżej T_g większość polimerów jest krucha. W miarę zbliżania się do temperatury zeszklenia uplastycznienie staje się możliwe. W temperaturze bliskiej temperaturze zeszklenia $T = T_g$ polimery termoplastyczne charakteryzuje podatność do dużego plastycznego odkształcenia przy prawie niezmienionej wartości naprężenia, podczas którego cząsteczki ustawiają się w kierunku działania naprężenia tzw. osiowania. Zerwanie próbki następuje, gdy proces osiowania zostaje zakończony. Przy jeszcze wyższej temperaturze $T \gg T_g$, polimery stają się lepkie i mogą być formowane, a materiały termoutwardzalne stają się gumowate i następnie ulegają rozkładowi.

Na rysunku 4.11 przedstawiono wytrzymałość na rozciąganie kompozytu polimerowego o osnowie ciągłej, wzmocnionej mocnymi włóknami, obciążonymi równoległe do osi włókien. Znajdują się na nim również przebiegi krzywych naprężenia dla osnowy i włókna.



Rys. 4.11. Naprężenie – odkształcenie dla kompozytu:
osnowa – włókno ciągłe, w porównaniu do krzywych dla włókien i osnowy

Źródło: M.F. Ashby, D.R. Jones, *Materiały inżynierskie, kształtowanie struktury*.

W początkowym zakresie zależność naprężenia jest linią prostą, która utrzymuje się aż do wystąpienia obciążenia, przy którym włókna zaczynają pękać, a przyrost obciążenia jest przenoszony przez włókna doznające odkształceń sprężystych. Po pękaniu i zerwaniu włókien przenoszone obciążenie zmniejsza się do wartości określonej naprężeniami, przy których odkształca się osnowa. Przy naprężeniach maksymalnych włókna kompozytu pękają, a osnowa

odkształca się plastycznie. Gdy pęka osnowa, kompozyt ulega zniszczeniu. Dla kompozytu ma więc znaczenie granica plastyczności osnowy i wytrzymałość na rozciąganie, a także udział objętościowy włókien. Istnieje pewien krytyczny ułamek objętości włókien, powyżej którego następuje wzmocnienie osnowy przez włókna. Sztywność i wytrzymałość kompozytów rosną wraz ze wzrostem ułamka objętości włókien, ale istnieje optymalny udział włókien – największy udział włókien nie powinien zwykle przekraczać 80%, gdyż przy ich większych zawartościach osnowa może nie wypełniać dokładnie wszystkich przestrzeni między włóknami.

Szczegółowe rozważania na tematy związane z badaniami wytrzymałości różnych materiałów w tym polimerów i kompozytów znajdują się w podręcznikach: M. Ashby, H. Shercliff, D. Cebon, *Inżynieria materiałowa*, Galaktyka, Łódź 2011; M. Kaczorowski, A. Krzyńska, *Konstrukcyjne metalowe, ceramiczne i kompozytowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017; M. Blicharski, *Wstęp do inżynierii materiałowej*, WNT, Warszawa 2003, 2012.

W tabelach 4.11-4.13 porównano właściwości wybranych materiałów polimerowych, ceramicznych, metalowych, kompozytów i drewna.

Tabela 4.11. Właściwości mechaniczne niektórych polimerów i kompozytów polimerowych

Materiał polimerowy	E [GPa]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	K _{Ic} [MPa · m ^{1/2}]	HV
Polimery termoplastyczne					
PTFE	0,47	21	27	1,5	-
PE	0,75	23	30	1,6	-
PA	1,4	50	55	3,5	-
PC	2,4	62	67	2,2	-
PS	2,7	34	43	0,88	-
PLA	3,4	63	57	5,0	-
Kauczuki, żywice, kompozyty					
NR	0,0016	24	24	0,14	-
IIR	0,001	4,9	4,9	0,064	-
EP	2,4	51	63	0,6	-
GFRP	20	150	180	13	10,8-21,5
CFRP	100	760	760	11	10,8-21,5

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: M.F. Ashby, *Materials and the environment...*, 2021.

Polimery są miękkie, elastyczne i ciągliwe, mają małą wytrzymałość. Zastosowane w kompozycie, przyczyniają się do wzrostu sztywności i wytrzymałości materiału (tabela 4.11). W przypadku kompozytów włóknistych, właściwości odniesione do jednostki masy, szczególnie dla kompozytu CFRP z włóknem węglowym są bardzo dobre i lepsze od stali, stopów aluminium i tytanu (tabela 4.13).

Właściwości drewna są ogólnie gorsze od właściwości metali. Po odniesieniu do gęstości właściwości te są porównywalne do stopu aluminium. Ponadto drewno jest tańsze od metali i stąd wynika zainteresowanie tym surowcem do wytwarzania niektórych kompozytów z polimerami.

Tabela 4.12. Porównanie właściwości mechanicznych wybranych materiałów ceramicznych i stopów metali

Materiał	E [GPa]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	K _{Ic} [MPa·m ^{1/2}]	HV
Ceramika					
Tlenek Al ₂ O ₃	320	-	240	3,60	1200
Szkło borokrzemowe	62	-	27	0,65	700
Stopy metali					
Stale niskowęglowe niskostopowe	200-210	300-870	450-1100	56-57	172-692
Stopy tytanu	110	870	950	66	267-380
Stopy aluminium	72	350	410	32	12-150

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: M.F. Ashby, *Materials and the environment...*, 2021.

Materiały ceramiczne charakteryzuje wyższa twardość od stopów metali, duży moduł sprężystości, przy większej kruchości. Natomiast w przypadku kompozytów włóknistych, właściwości odniesione do jednostki masy, szczególnie dla kompozytu CFRP są bardzo dobre i lepsze od stali, stopów aluminium i tytanu.

Właściwości drewna są ogólnie gorsze od właściwości metali. Po odniesieniu do gęstości właściwości te są porównywalne do stopu aluminium. Ponadto drewno jest tańsze od metali i stąd wynika zainteresowanie tym surowcem do wytwarzania niektórych kompozytów z polimerami.

Tabela 4.13. Porównanie właściwości kompozytów GFRP i CFRP z niektórymi stopami metali i drewnem

Materiał	Gęstość [g·cm ⁻³]	E [GPa]	R _m [MPa]	K _{Ic} [MPa·m ^{1/2}]	E/gęstość	R _m /gęstość
Kompozyt GFRP żywica poliestrowa wzmacniana włóknami szklanymi, obciążonymi równolegle do osi włókna (włókna - 50% obj.)	2,00	48	1240	42-60	24	620
Kompozyt CFRP żywica epoksydowa wzmacniana włóknami węglowymi, obciążonymi równolegle do osi włókna (włókna - 58% obj.)	1,50	189	1050	32-45	126	700
Stopy metali stal wysokowytrzymała	7,80	207	1500	50	27	190
stop tytanu	5,00	120	1400	-	24	280
stop aluminium	2,80	71	500	28	25	179
Drewno (sosna)	0,55	16,3 do włókna	89 do włókna	0,35 do włókna	30	162

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: M.F. Ashby, D.R. Jones, *Materiały inżynierskie*; M. Blicharski, *Wstęp do inżynierii materiałowej*, WNT, Warszawa, 2003, 2012.

4.6.7. Przykłady właściwości i zastosowania wybranych kompozytów

CHARAKTERYSTYKA KOMPOZYTÓW CFRP i GFRP

CFRP (*carbon fiber reinforced polimer*) – kompozyt: włókno węglowe – polimer

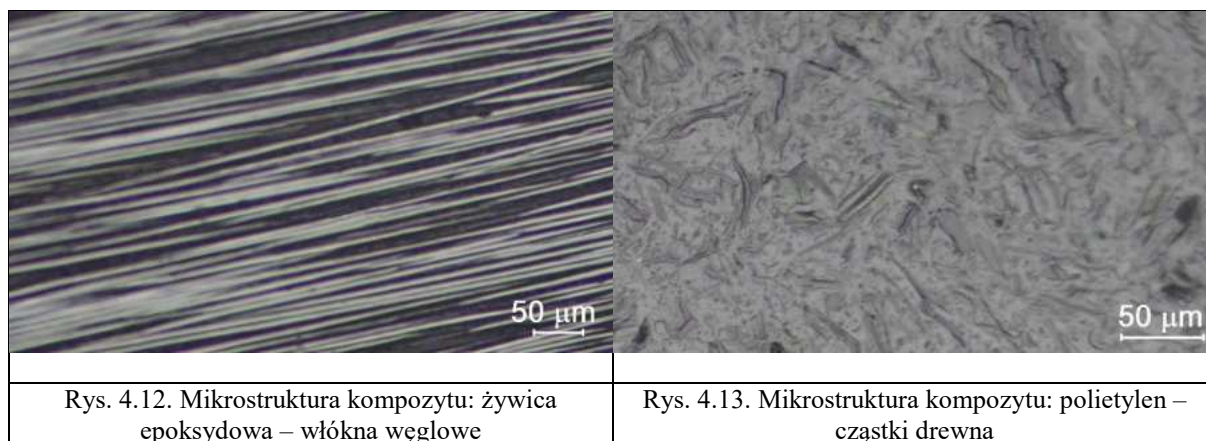
CFRP – materiał kompozytowy złożony z:

- osnowy (najczęściej żywicy epoksydowej),
- wzmocnienia w postaci włókien węglowych.

Włókna węglowe mają bardzo wysoką wytrzymałość na rozciąganie, sztywność, niską gęstość oraz odporność na zmęczenie i korozję. Są droższe niż inne rodzaje włókien (np. szklane). CFRP cechuje się korzystnym stosunkiem wytrzymałości do masy, dlatego wykorzystywany jest w zastosowaniach wymagających niskiej masy przy jednoczesnym zachowaniu dużej wytrzymałości i sztywności.

Zastosowanie:

- lotnictwo i kosmonautyka (konstrukcje nośne, panele, kadłuby),
- motoryzacja sportowa (karoserie, części zawieszenia),
- sprzęt sportowy (rowery, rakiety tenisowe, narty),
- wyroby medyczne (protezy, implanty),
- elektronika (obudowy, radiatory).



Na rys. 4.12 przedstawiona jest mikrostruktura kompozytu żywica epoksydowa – włókno węglowe, a na rys. 4.13 kompozytu wykonanego z polietylenu z cząstkami drewna. Są to materiały własne Laboratorium Materiałoznawstwa Akademii Nauk Stosowanych w Koninie. Zdjęcia mikrostruktur wykonano na mikroskopie metalograficznym DO MET-1000-TRF, znajdującym się w ANS w Koninie. Dokonano także pomiarów mikrotwardości kompozytu żywica – włókno węglowe w porównaniu z żywicą, które zostały wykonane przy użyciu twardościomierza Brinell-Rockwell-Vickers HBRV-187.5E, znajdującym się także na wyposażeniu laboratorium. Stwierdzono umocnienie spowodowane włóknom węglowym. Średnia twardość dla żywicy wynosi 21,0 HRK (dla żywicy), a dla kompozytu 41,5 HRK.

GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) – kompozyt: włókno szklane – polimer

GFRP – materiał kompozytowy złożony z:

- osnowy (zazwyczaj żywicy epoksydowej, poliestrowej), która pełni funkcję spoiwa i przenosi naprężenia na zbrojenie,
- wzmocnienia w postaci włókien szklanych.
- które nadają materiałowi wysoką wytrzymałość mechaniczną, odporność na udary oraz lepszą stabilność wymiarową.



Włókna szklane są chemicznie odporne, a także stosunkowo tanie i lekkie. Materiał ten charakteryzuje się korzystnym stosunkiem wytrzymałości do masy, dobrą odpornością na korozję oraz możliwością formowania złożonych kształtów.

Zastosowanie:

- obudowy maszyn i urządzeń,
- elementy karoserii pojazdów (autobusów, ciężarówek),
- elementy architektoniczne fasad i budynków,
- baseny, zbiorniki, łodzie, meble zewnętrzne.

4.6.8. Nanokompozyty

Nanokompozyt polimerowy oznacza materiał dwufazowy, w którym w osnowie polimerowej są równomiernie rozmieszczone pojedyncze cząstki napelniaacza, przy czym przynajmniej jeden z wymiarów cząstek nie przekracza kilku nanometrów.

Jako osnowy stosowane są: elastomery i plastomery.

Drugą fazą nanokompozytów polimerowych są najczęściej substancje nieorganiczne, np.:

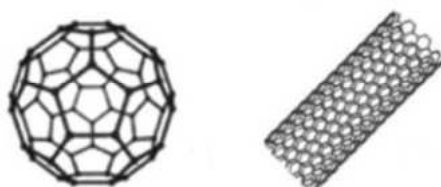
- krzemionki, krzemiany (np. momtmorylonit),
- fullereny i nanorurki węglowe,
- grafit,
- metale,
- ceramika.

NANOKOMPOZYTY Z UDZIAŁEM MATERIAŁÓW WĘGLOWYCH I CERAMICZNYCH

Węgiel występuje w odmianach krystalograficznych jako diament, grafit, sadza – alotropowa bezpostaciowa, fulereny, nanorurki. Nanorurki węglowe otrzymuje się najczęściej przez odparowanie grafitu w atmosferze helu w wysokiej temperaturze oraz przez katalityczny rozkład węglowodorów. Nanorurki węglowe (jednościenne i wielościenne) mają średnicę dochodzącą do ułamków nanometra i długość rzędu mikrometra. Mogą się różnić kształtem oraz skrętnością, w związku z czym mogą mieć różną konfigurację względem osi (rys. 4.14).

Mają bardzo dobre właściwości fizyczne i mechaniczne. Gęstość nanorurek węglowych jest prawie o połowę mniejsza niż aluminium (ok. $1,75 \text{ g/cm}^3$), wytrzymałość 20 razy większa niż stali (wytrzymałość na rozciąganie R_m ok. 20 GPa i moduł Younga E ok. 1000 GPa), przewodnictwo elektryczne 1000 razy większe niż miedzi, a przewodnictwo cieplne 7 razy większe niż miedzi. Dla nanorurek przewodnictwo cieplne wynosi 3000 W/(mK) , a miedzi 385 W/(mK) .

Fulereny otrzymuje się podobnie jak nanorurki przez odparowanie prętów grafitowych o dużej czystości w atmosferze helu. W ten sposób z otrzymanej sadzy fulerenowej metodą ekstrakcji za pomocą toluenu lub benzenu wydzielają się fulereny. Strukturę fulerenu tworzą cząstki węgla o liczbie atomów C_{60} , C_{70} itd. i strukturze przestrzennej podobnej do piłki futbolowej (rys. 4.14).



Rys. 4.14. Fulereny i nanorurki węglowe

Opracowanie na podst.: K. Kelar, *Technologia wytwarzania części maszyn z poliamidu 6 modyfikowanego nanocząsteczkami*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.



Właściwości nanorurek i fulerenów można kształtować przez domieszkowanie atomami innych pierwiastków. Trudnością technologiczną jest odpowiednie zdyspergowanie w osnowie polimerowej, aby nie tworzyły aglomeratów. Zaletą nanokompozytów polimerowych jest możliwość projektowania i prognozowania ich właściwości przez odpowiedni dobór składników, ich relacji jakościowych i ilościowych w celu zapewnienia wymaganych właściwości wyrobów. Perspektywą ich zastosowania jest przemysł motoryzacyjny, elektromaszynowy, produkcji sprzętu medycznego i sportowego.

Badania nanokompozytów z udziałem fulerenów i nanorurek, a także materiału ceramicznego z grupy krzemianów w postaci montmorylonitu z osnową polimerową poliamidu 6 przedstawione w tabeli 4.14 otworzyły perspektywy możliwości ich zastosowania na części maszyn.

Tabela 4.14. Właściwości mechaniczne niemodyfikowanego poliamidu PA6 oraz nanokompozytu PA6 z montmorylonitem, fulerenami i nanorurkami

Materiał	R _m [MPa]	E [MPa]	A [%]
PA6 niemodyfikowany	40	1100	25,1
Nanokompozyt PA6+2% mas. montmorylonitu	69	1275	23,8
Nanokompozyt PA6+0,1% mas. fulerenów	65	1280	24,0
Nanokompozyt PA6+0,1% mas. nanorurek	71	1330	24,5

Źródło: Opracowanie na podst.: K. Kelar, *Technologia wytwarzania części maszyn*.

Otrzymane średnie wyniki z badań wskazują, że zastosowanie nanonapełniaczy w małym stopniu, takich jak montmorylonit, fulereny czy nanorurki, znacząco poprawia parametry mechaniczne oraz odporność termiczną poliamidu PA6. Zaobserwowano do ok. 2-krotny wzrost zarówno wytrzymałości na rozciąganie oraz zwiększenie sztywności (moduł Younga E), przy czym większe wartości stwierdzono dla nanokompozytów PA6/nanorurki. Obecność nanonapełniaczy wpływa na przebieg procesów krystalizacji, prowadząc do uzyskania materiałów o lepszych właściwościach użytkowych. Dzięki tak uzyskanym parametrom, nanokompozyty na bazie PA6 mogą znaleźć zastosowanie w zaawansowanych technologiach, gdzie wymagane są wysoka wytrzymałość, sztywność oraz stabilność wymiarowa w szerokim zakresie temperatur.

4.6.9. Biokompozyty polimerowe

Jak wynika z informacji z pracy: J. Miedzianowska, M. Masłowski, K. Strzelec, *Kompozyty polimerowe zawierające włókna roślinne – czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną*, „Technologia i Jakość Wyrobów” 2018, 63, s. 45-54, w ostatnich latach pojawiło się zainteresowanie biokompozytami polimerowymi, zawierającymi włókna roślinne. Włókna te są łatwo dostępne, mają niską cenę i odnawialny charakter. Włókna roślinne można podzielić na: włókna z drewna (drzewa iglaste i liściaste); włókna z nasion: np. bawełny, z liści, owoców, z traw i słomy. Wybór ośrodka polimerowego do kompozytu jest ograniczony przez temperaturę, w której następuje rozkład termiczny włókna, najczęściej powyżej 200°C. Najbardziej powszechnymi polimerami są termoplasty: polietylen (PE), polipropylen (PP). Podobnie jak przy innych włóknach, właściwości mechaniczne kompozytu zależą od właściwości elementów wzmacniających, co powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie, zwiększenie sztywności około kilku do kilkunastu procent w stosunku do czystego polimeru.



Wadą drewna jest jego łatwopalność, anizotropia właściwości mechanicznych i hydrofilowość wpływająca na niestabilność wymiarów. Mączkę drzewną otrzymuje się głównie z odpadów powstających w procesach obróbki drewna, klasyfikując je pod względem koloru oraz wymiarów i kształtu ziaren mączki. Jedną z zalet kompozytów polimerowo-drzewnych w porównaniu z kompozytami zawierającymi wypełniacze nieorganiczne jest ich mniejsza gęstość. Stwierdzono, że kompozyty zawierające ok. 40 % mas. wypełniacza drzewnego charakteryzują się cechami umożliwiającymi wykonywanie z nich wyrobów o walorach użytkowych oczekiwanych przez dostawców z surowców odpadowych. O wyborze polietylenu jako osnowy decyduje jego mała chłonność wody, dzięki czemu stanowi dobrą barierę dla wilgoci mogącej wnikać do drewna zawartego w kompozytach polimerowo-drzewnych. Mała nasiąkliwość, zwłaszcza w porównaniu z nasiąkliwością drewna, jest jedną z ważniejszych cech decydujących o przydatności WPC do wielu zastosowań.

Przykład struktury kompozytu polimerowo – drzewnego znajduje się na rys. 4.13. W strukturze występują nierównomiernie rozłożone cząstki drewna o różnych kształtach i rozmiarach. Materiał znajduje zastosowanie na wyroby w przemyśle meblarskim np. na deski podłogowe.

Zalety kompozytów z włóknami naturalnymi – wynikają z dostępności włókien naturalnych, ich niskiego kosztu, małej gęstości, łatwych procesów recyklingu oraz mniejszej ilości produktów odpadowych pozostających po spaleniu. Aktualne trendy w rozwoju biokompozytów skupiają się na materiałach wytworzonych z biodegradowalnych poliestrów. Najbardziej popularne to np. poli(kwas mlekowy) (PLA), który można wytwarzać z odnawialnych surowców (np. kukurydza, ziemniaki).

W tabeli 4.15 porównano zalety i wady materiałów polimerowych oraz kompozytów na osnowie polimerów istotnych podczas doboru materiałów konstrukcyjnych podczas projektowania. Wynika z nich, że zalety kompozytów pozwalają je współcześnie zaliczyć do materiałów o najlepszych właściwościach w ekstremalnych warunkach użytkowania.

Tabela 4.15. Porównanie zalet i wad polimerów i kompozytów

Materiał	Zalety	Wady
Polimery dostateczne R_e , K_{Ic} małe E	mała gęstość, ciągliwe i łatwe do kształtowania, odporne na korozję,	mała sztywność ($E \approx 2$ GPa), granica plastyczności ($R_e \approx 2$ -100 MPa), niska temperatura zeszklenia ($\approx 100^\circ\text{C}$) $\rightarrow$ pełzanie, mała wiązkość (~ 1 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$)
Kompozyty duże E , R_e , K_{Ic} drogie	mała gęstość, sztywne ($E > 50$ GPa), duża granica plastyczności ($R_e \approx 200$ MPa), odporne na pękanie ($K_{Ic} > 20$ MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$), odporne na zmęczenie, odporne na korozję	trudności w nadawaniu kształtu, pełzanie przy osnowie polimerowej, koszt

Źródło: Opracowanie na podst.: M.F. Ashby, D.R. Jones, *Materiały inżynierskie, kształtowanie struktury*.



Bibliografia

- Ashby M., Shercliff H., Cebon D., *Inżynieria materiałowa*, tom 1 i 2, Wydawnictwo Galaktyka, Łódź 2011.
- Ashby M.F., *Materials and the environment. Eco-informed material choice*, Elsevier Inc., 2009.
- Ashby M.F., Jones D.R., *Materiały inżynierskie, właściwości i zastosowanie*, t.1, WNT, Warszawa, 1995.
- Ashby M.F., Jones D.R. *Materiały inżynierskie, kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, t. 2, WNT, Warszawa, 1996.
- Ashby M.F., *Materials and the environment. Eco-informed material choice*, Elsevier Inc., 2021.
- Blicharski M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*, WNT, Warszawa, 2003, 2012.
- Boczkowska A., Kapuściński J., Lindermann Z., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- Ciszewski A., Radomski T., Szummer A., *Materiałoznawstwo*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- Czarnecka-Komorowska D., *Przetwórstwo tworzyw i kompozytów polimerowych w obiegu zamkniętym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2023.
- Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2002.
- Głowacka M., Łabanowski J., Landowski M., *Współczesne materiały inżynierskie. Wybrane grupy materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023.
- Głowińska E., Pacheta-Szwindowska P., Datta J., *Wstęp do technologii polimerów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022.
- Kaczorowski M., Krzyńska A., *Konstrukcyjne metalowe, ceramiczne i kompozytowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017.
- Kelar K., *Technologia wytwarzania części maszyn z poliamidu 6 modyfikowanego nanocząsteczkami*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań, 2006.
- Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- Kucharczyk W., Żurowski W., *Przetwórstwo tworzyw sztucznych dla mechaników*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- Leda H., *Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi. Wytwarzanie. Właściwości. Zastosowanie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- Miedzianowska J., Masłowski M., Strzelec K., *Kompozyty polimerowe zawierające włókna roślinne – czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną*, „Technologia i Jakość Wytrobów” 2018, 63, s. 45-54.
- Rabek J.F., *Polimery i ich zastosowanie interdyscyplinarne*, tom 1 i 2, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2020.

<https://epodreczniki.openagh.edu.pl>



Monika Muszyńska

Rozdział 5. Przetwórstwo tworzyw sztucznych

5.1. Wprowadzenie

Nowoczesne tworzywa sztuczne znacząco wpłynęły na rozwój technologiczny oraz zmiany stylu życia we współczesnym świecie. Dzięki ich dynamicznemu rozwojowi możliwe stało się wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań, które jeszcze kilkanaście lat temu były poza zasięgiem technologicznym. Obecnie materiały polimerowe nie tylko poprawiają komfort i bezpieczeństwo życia codziennego, ale także odgrywają istotną rolę w działaniach na rzecz zrównoważonego rozwoju m.in. poprzez ograniczenie zużycia surowców naturalnych oraz energii, a także dzięki coraz skuteczniejszym metodom recyklingu. Zastosowanie tworzyw sztucznych obejmuje niemal wszystkie gałęzie przemysłu - od motoryzacji i budownictwa, przez produkcję maszyn, aż po elektronikę, medycynę i branżę opakowaniową. Ta wszechstronność sprawia, że przemysł tworzyw sztucznych jest jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów sektora chemicznego, zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej.

Choć pierwsze tworzywa powstały już w XIX wieku, to ich masowa produkcja rozpoczęła się dopiero w latach 50. XX wieku. Od tamtej pory obserwujemy systematyczny wzrost wolumenu produkcji na świecie. Według danych Plastics Europe oraz Statista¹, w 2022 roku globalna produkcja tworzyw sztucznych przekroczyła 400 milionów ton, a prognozy wskazują na dalszy wzrost w nadchodzących latach, choć z nieco niższą dynamiką niż w ubiegłych dekadach.

Największym producentem tworzyw sztucznych pozostają Chiny, które odpowiadają za ponad 30% światowej produkcji. W dalszej kolejności plasują się kraje stowarzyszenia NAFTA (Stany Zjednoczone, Kanada, Meksyk) oraz Europa, której udział w globalnym rynku w ostatnich latach utrzymuje się na poziomie około 15–17%. W Europie produkcja tworzyw w 2022 roku wyniosła około 57 milionów ton, co oznacza nieznaczny spadek w porównaniu z latami wcześniejszymi. Tendencja ta wynika częściowo z zaostrzających się regulacji środowiskowych, rosnących kosztów energii oraz zmian w strukturze popytu, szczególnie w sektorze opakowaniowym.

Dla inżynierów mechaników i konstruktorów maszyn znajomość właściwości fizycznych, chemicznych i przetwórczych tworzyw sztucznych ma dziś kluczowe znaczenie. Coraz częściej materiały polimerowe zastępują metale czy ceramikę, szczególnie tam, gdzie istotna jest redukcja masy, odporność na korozję, elastyczność konstrukcji lub możliwość kształtowania skomplikowanych geometrii. Rozwój kompozytów, tworzyw wysokotemperaturowych oraz biodegradowalnych otwiera nowe możliwości projektowania i wytwarzania komponentów maszynowych, jednocześnie wpisując się w trendy gospodarki cyrkularnej.

Przemysł tworzyw sztucznych w Polsce należy do kluczowych sektorów produkcyjnych obok przemysłu spożywczego, motoryzacyjnego i metalowego. Stanowi on jedną z podstaw współczesnego rozwoju gospodarczego kraju (tabela 5.1). Szacuje się, że w branży zatrudnionych jest ponad 160 tysięcy pracowników, a jej roczne obroty przekraczają 85 miliardów złotych, co czyni ją jednym z największych sektorów przemysłowych w kraju pod względem wartości dodanej.

¹ <https://www.statista.com/statistics/987838/plastics-production-volume-in-the-eu-28/> (dostęp, 28.04.2025)



Sektor ten jest złożony i obejmuje szerokie spektrum działalności. W jego skład wchodzi zarówno producenci surowców polimerowych i dodatków modyfikujących, jak również komponenty (specjaliści od mieszanek polimerowych), dystrybutorzy surowców, a także przetwórcy, którzy zajmują się wytwarzaniem półproduktów i gotowych wyrobów z tworzyw sztucznych. Dodatkowo istotną rolę odgrywają producenci urządzeń technologicznych do przetwórstwa oraz przedsiębiorstwa zajmujące się recyklingiem.

Największą i najbardziej dynamicznie rozwijającą się część sektora stanowi właśnie przetwórstwo tworzyw sztucznych, które generuje około 85% obrotów całej branży. Główne obszary tej działalności obejmują:

- produkcję opakowań z tworzyw sztucznych (np. butelki, pojemniki, torby foliowe),
- wytwarzanie rur i profili technicznych wykorzystywanych m.in. w budownictwie,
- komponenty dla przemysłu motoryzacyjnego (np. elementy karoserii, wnętrza),
- produkcję kabli i przewodów.

W Polsce wytwarzane są niemal wszystkie podstawowe rodzaje tzw. tworzyw masowych, w tym:

- **poliolefiny**: polietylen wysokiej (HDPE) i niskiej (LDPE) gęstości oraz polipropylen (PP),
- **polichlorek winylu** (PVC),
- **polistyreny**: standardowy (PS) oraz spieniony (EPS),
- **politereftalan etylenu** (PET).
- Produkcja **tworzyw konstrukcyjnych** obejmuje natomiast takie materiały jak:
- **poliamidy** (np. PA6),
- **polioksymetylen** (POM),
- **poliestrowe żywice termoutwardzalne**,
- **żywice epoksydowe i fenolowe**,
- **systemy poliuretanowe** wykorzystywane m.in. w izolacjach cieplnych i elementach o dużej trwałości mechanicznej.

Tabela 5.1. Znaczenie wybranych sektorów przemysłu w Polsce (stan na ok. 2022–2023 r.)

Branża przemysłowa	Liczba zatrudnionych	Roczna wartość obrotów [z zł]	Udział w PKB przemysłowym	Uwagi
Przemysł spożywczy	ok. 400 tys.	ok. 300 mld	wysoki	Największy pracodawca w przemyśle
Przemysł motoryzacyjny	ok. 200 tys.	ok. 160 mld	wysoki	Silnie eksportowy sektor
Przemysł metalowy i maszynowy	ok. 180 tys.	ok. 140 mld	średni/wysoki	Kluczowy dla budowy infrastruktury
Przemysł tworzyw sztucznych	ok. 160 tys.	ponad 85 mld	średni	Jedna z najszybciej rozwijających się branż
Przemysł chemiczny (ogółem)	ok. 130 tys.	ok. 90-100 mld	średni	W tym produkcja farb, nawozów, detergentów

Źródło: PlasticEurope.

Na rynku krajowym działają również przedstawicielstwa największych globalnych koncernów chemicznych, które za pośrednictwem lokalnych dystrybutorów dostarczają nowoczesne surowce i dodatki dla polskiego przemysłu.



W latach 2008-2018 sektor przetwórstwa gumy i tworzyw sztucznych w Polsce zanotował wzrost o ponad 120%, co oznacza średnioroczne tempo wzrostu (CAGR) wynoszące około 9%. Dla porównania, cały przemysł przetwórczy (manufacturing) wzrósł w tym okresie o około 70% (CAGR 6,8%)².

Szczególnie intensywny wzrost zanotowano w roku 2018, gdy produkcja w branży przetwórstwa tworzyw zwiększyła się o około 6%, a wartość produkcji wyrobów finalnych z tworzyw sztucznych wzrosła, wg danych PlasticsEurope – aż o 7%³.

Prognozy na kolejne lata pozostają optymistyczne, szczególnie w kontekście rosnącego zapotrzebowania na lekkie i trwałe komponenty w przemyśle motoryzacyjnym, budownictwie, logistyce oraz w nowoczesnych technologiach, takich jak druk 3D, elektronika użytkowa czy rozwiązania proekologiczne (biotworzywa, materiały biodegradowalne, systemy recyklingu zamkniętego obiegu).

Polska od lat wyróżnia się dynamicznym wzrostem zapotrzebowania na tworzywa sztuczne, zwłaszcza w sektorze przetwórstwa. W latach 2000-2018 produkcja wyrobów z gumy i tworzyw sztucznych wzrosła ponad czterokrotnie, co świadczy o silnym rozwoju technologii i rosnącym znaczeniu materiałów polimerowych w przemyśle.

W 2018 roku zużycie tworzyw przez krajowych przetwórców wyniosło około 3,5 mln ton, co oznaczało wzrost o 3,5% w porównaniu z rokiem poprzednim. Dla porównania, w tym samym czasie zużycie w całej Europie delikatnie spadło i wyniosło 51,2 mln ton (spadek o 0,2%). Udział Polski w europejskim zużyciu tworzyw wynosi około 6,8%, co plasuje ją na szóstym miejscu w Europie, po Niemczech, Włoszech, Francji, Hiszpanii i Wielkiej Brytanii.

Najważniejsze segmenty wykorzystania tworzyw w Polsce i Europie to:

- opakowania – 35% udziału w Polsce, 39,9% w Europie,
- budownictwo – 24% w Polsce, 19,8% w Europie,
- motoryzacja – 10% w Polsce, 9,9% w Europie⁴.

Pod względem struktury surowcowej dominują:

- polietyleny (LDPE, LLDPE, HDPE) – około 31%,
- polipropylen – 20%,
- PVC – 13%,
- polistyren i EPS – łącznie około 10%.

Sektor opakowań wykazuje największe zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne i charakteryzuje się systematycznym wzrostem. W latach 2010-2018 zużycie tworzyw w tej branży wzrosło o prawie 60%, z 744 tys. ton do ponad 1,2 mln ton. W szczególności wzrosło zastosowanie poliolefin, wykorzystywanych w produkcji lekkich i wytrzymałych opakowań foliowych, butelek i pojemników.

Tworzywa sztuczne wykorzystywane w opakowaniach oferują szereg zalet:

- są lekkie, co przekłada się na niższe zużycie paliwa w transporcie,
- chronią produkty przed zanieczyszczeniem i uszkodzeniem,
- umożliwiają tworzenie inteligentnych opakowań, które np. wydłużają okres trwałości żywności,
- charakteryzują się niskim udziałem masowym, co średnio stanowi jedynie 3-4% masy opakowanego wyrobu, co przekłada się na mniejsze emisje CO₂.

² <https://plasticseurope.org/pl/2023/05/24/rynek-tworzyw-sztucznych-w-polsce-i-europie-wysoka-srednioroczna-stopa-wzrostu-ale-nizsze-tempo-od-polowy-2022-roku/> (dostęp 28.04.2025)

³ <https://plasticseurope.org/pl/knowledge-hub/branza-tworzyw-sztucznych-2024/> (dostęp 28.04.2025)

⁴ https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2023/10/Tworzywa-fakty-w-pigulce-2023_PL.pdf (dostęp 28.04.2025)



5.2. Podział tworzyw sztucznych ze względu na właściwości użytkowe

Tworzywa sztuczne, ze względu na ich zachowanie w różnych warunkach użytkowania, dzieli się na trzy główne grupy: duroplasty, termoplasty oraz elastomery. Każda z tych grup charakteryzuje się odmienną strukturą chemiczną i fizyczną, a co za tym idzie różnym zakresem zastosowań przemysłowych.

Duroplasty (tworzywa termoutwardzalne) – są to materiały cechujące się dużą twardością i odpornością na działanie temperatury oraz czynników chemicznych. Po uformowaniu i utwardzeniu nie mogą być ponownie uplastycznione, ponieważ tracą swoją plastyczność na zawsze. Duroplasty charakteryzują się również wysoką sztywnością i wytrzymałością mechaniczną, co sprawia, że często pełnią funkcję zamienników metali, szczególnie tam, gdzie wymagane są dobre właściwości izolacyjne lub odporność na korozję. W niektórych zastosowaniach duroplasty z powodzeniem zastępują ceramikę, np. w elementach odpornych na wysoką temperaturę lub ścieranie. W inżynierii materiałowej nazywane są również tworzywami sztucznymi konstrukcyjnymi, ponieważ można z nich wykonywać części maszyn, osprzęt elektryczny, izolatory czy formy przemysłowe.

Termoplasty (tworzywa termoplastyczne) – to najliczniejsza i najbardziej wszechstronna grupa tworzyw. W przeciwieństwie do duroplastów, termoplasty można wielokrotnie uplastycznić i formować pod wpływem temperatury, co czyni je bardzo łatwymi w przetwarzaniu. Po ostygnięciu zachowują nadany kształt, ale podgrzanie umożliwia ich ponowne formowanie. Z tego względu termoplasty są materiałem idealnym do takich technik jak wtryskiwanie, wytłaczanie, termoformowanie czy zgrzewanie. Pod względem właściwości mechanicznych są zazwyczaj mniej sztywne niż duroplasty, ale za to bardziej elastyczne i odporne na udary. Ich dużą zaletą jest możliwość uzyskiwania bardzo złożonych kształtów przy relatywnie niskim koszcie produkcji. Z powodzeniem wykorzystuje się je do produkcji: obudów maszyn i urządzeń, komponentów sprzętu AGD, złączy instalacyjnych i elementów systemów rurowych, a także w zastosowaniach zastępujących drewno (np. listwy przypodłogowe, panele czy uchwyty). Niektóre wysokowytrzymałe termoplasty (np. PEEK, PPS) są stosowane także w elementach konstrukcyjnych o zwiększonym obciążeniu mechanicznym.

Elastomery (tworzywa elastyczne) – to grupa tworzyw charakteryzujących się wyjątkową zdolnością do odwracalnych odkształceń po rozciągnięciu, ściśnięciu czy zgięciu powracają do swojego pierwotnego kształtu. Dzięki tej właściwości znalazły szerokie zastosowanie w produkcji uszczelek, przewodów elastycznych, amortyzatorów, membran i wyrobów odpornych na wibracje. Materiałami tymi niemal całkowicie zastąpiono kauczuk naturalny, zwłaszcza w aplikacjach technicznych, gdzie wymagane są: odporność na działanie olejów, smarów, paliw, a także elastyczność w szerokim zakresie temperatur, trwałość mechaniczna i chemiczna. Współczesne elastomery (np. EPDM, NBR, silikonowe) znalazły również nowe zastosowania, których nie umożliwiały tradycyjne kauczuki jak np. w przemyśle lotniczym, medycynie czy elektronice.

W tabeli 5.2 przedstawiono podstawowe procesy przetwórstwa tworzyw sztucznych.

Tabela 5.2. Najczęściej stosowane metody przetwórstwa tworzyw sztucznych

Metoda przetwarzania	Rodzaj tworzywa	Charakterystyka procesu	Przykłady wyrobów
Wtryskiwanie	Termoplasty, elastomery	Wtrysk uplastycznionego tworzywa do formy o zamkniętym kształcie	Obudowy urządzeń, zębaki, klamki, pojemniki, elementy AGD
Wyłaczanie	Termoplasty	Ciągłe tłoczenie uplastycznionego materiału przez dyszę o zadanym profilu	Rury, profile okienne, folie, taśmy, przewody
Wyłaczanie z rozdmuchem	Termoplasty (gł. PE, PP, PET)	Połączenie wyłaczania i nadmuchiwania do uzyskania form pustych	Butelki, kanistry, pojemniki na chemikalia
Formowanie rotacyjne (rotomolding)	Termoplasty (gł. PE)	Obrót formy w wysokiej temperaturze – równomierne rozprowadzenie tworzywa	Zbiorniki, kajaki, zabawki, pojemniki o dużej objętości
Formowanie próżniowe (termoformowanie)	Termoplasty (gł. PET, PS)	Podgrzanie arkusza tworzywa i formowanie go na matrycy za pomocą podciśnienia	Opakowania jednorazowe, tacki, osłony przemysłowe
Laminowanie	Duroplasty, termoplasty	Warstwowe łączenie materiałów z wykorzystaniem tworzyw jako spoiwa	Płyty kompozytowe, elementy karoserii, panele konstrukcyjne
Formowanie reaktywne (np. RIM)	Duroplasty (np. PU, epoksydy)	Reakcja chemiczna komponentów bezpośrednio w formie	Zderzaki, elementy techniczne, obudowy elektroniki
Wulkanizacja i formowanie elastomerów	Elastomery (np. EPDM, NBR)	Kształtowanie przy użyciu formy i utrwalanie struktury za pomocą sieciowania	Uszczelki, opony, amortyzatory, przewody elastyczne
Kalandrowanie	Termoplasty (gł. PVC)	Walcowanie tworzywa na cienkie warstwy	Folie techniczne, wykładziny, membrany
Spienianie	Termoplasty, elastomery	Wprowadzanie gazu do struktury tworzywa – powstaje materiał lekki i izolacyjny	Styropian (EPS), pianki PU, izolacje termiczne i akustyczne

Źródło: M. Strankowski, J. Gołębek, K. Formela, J. Datta, *Podstawy technologii przetwórstwa materiałów polimerowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2024.

5.3. Wyłaczanie tworzyw sztucznych

Wyłaczanie (ekstruzja) to jeden z podstawowych procesów technologicznych stosowanych w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Jest to proces ciągły, w którym uplastyczniony materiał polimerowy jest formowany do postaci gotowego wyrobu lub półproduktu o określonym kształcie. Ostateczna forma uzyskiwana jest poprzez przecięnięcie uplastycznionego tworzywa przez profilowany ustnik (matrycę), zamontowany w głowicy wylączarki.

Proces wyłaczania umożliwia otrzymywanie wyrobów takich jak:

- profile techniczne i budowlane,

- płyty i arkusze,
- folie techniczne i opakowaniowe,
- rury, węże, pręty i inne kształtowniki.

Dzięki odpowiedniej konfiguracji maszyn oraz kontroli parametrów procesu możliwe jest osiągnięcie bardzo wysokich wydajności – w warunkach przemysłowych może to być nawet ponad 1000 kg tworzywa na godzinę (Stasiek, 2007).

Jako materiał wsadowy stosuje się zazwyczaj:

- granulát,
- proszek,
- płatki po regranulacji,
- rozdrobnione odpady (wióry, mielonki).



Rys. 5.1. Typowa wylaczarka laboratoryjna (zdjęcie z archiwum autorki)

Główne cele procesu wytłaczania

Proces wytłaczania może realizować różne funkcje technologiczne, spośród których najważniejsze to formowanie kształtu oraz homogenizacja (mieszanie) składników mieszanki.

Formowanie – podstawowym celem procesu jest nadanie pożądanego kształtu uplastycznionemu tworzywu. Dzieje się to pod wpływem wysokiego ciśnienia wytwarzanego przez obracający się ślimak wylaczarki, który wtlacza materiał przez specjalnie zaprojektowany ustnik. W zależności od rodzaju przetwarzanego materiału i jego właściwości (np. wrażliwość na temperaturę), stosuje się różne typy wylaczarek:

- Wylaczarki jednoślímakowe – najczęściej stosowane w przypadku czystych, jednorodnych polimerów. Są proste w obsłudze, ekonomiczne i powszechnie używane w produkcji przemysłowej.
- Wylaczarki dwuślímakowe przeciwbieżne – wykorzystywane do przetwórstwa tworzyw wrażliwych na przegrzewanie, takich jak PVC. Zapewniają lepszą kontrolę temperatury i homogenizacji materiału.
- Wylaczarki dwuślímakowe współbieżne – stosowane tam, gdzie potrzebne jest intensywne mieszanie materiałów, np. w produkcji kompozytów polimerowych, materiałów modyfikowanych oraz mieszanek z dodatkami funkcjonalnymi.

Mieszanie składników (kompaundowanie) – wylaczarki, zwłaszcza współbieżne dwuślímakowe, pełnią również funkcję bardzo wydajnych mikserów do tworzyw sztucznych. Umożliwiają dokładne wymieszanie wielu składników, takich jak:

- napelniacze mineralne (np. kreda, talk, włókna szklane),
- dodatki modyfikujące (np. stabilizatory UV, środki poślizgowe, plastyfikatory),
- barwniki,
- recyklaty i dodatki specjalne.

Choć mieszanie można realizować także w urządzeniach cyklicznych, takich jak:

- mieszarki intensywne,
- walcarki laboratoryjne, to właśnie wylączarki zapewniają ciągłość procesu i większą wydajność, która jest kluczowa w zastosowaniach przemysłowych.

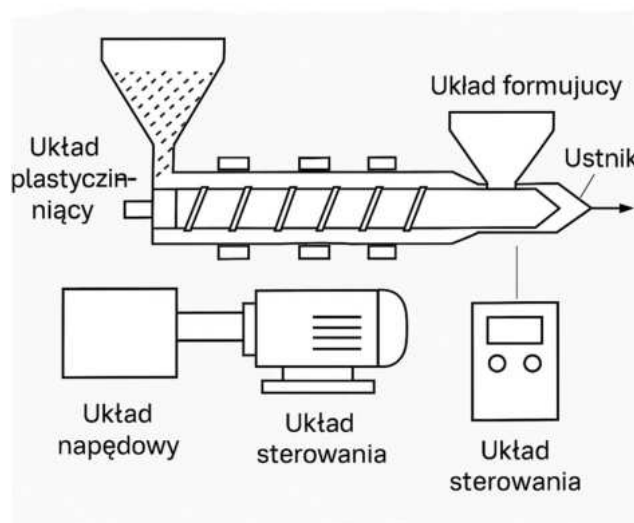
Wybór urządzenia do mieszania zależy przede wszystkim od:

- skali produkcji - małe partie mieszane są zwykle w laboratoriach cyklicznie,
- wymaganego stopnia homogenizacji - wylączarki dwuślimakowe pozwalają uzyskać jednorodny materiał o kontrolowanych właściwościach⁵.

Budowa typowej wylączarki

Wylączarka to złożone urządzenie przemysłowe służące do ciągłego przetwarzania tworzyw sztucznych poprzez uplastycznianie, formowanie i nadawanie odpowiedniego kształtu wyrobom. Niezależnie od typu, większość przemysłowych wylączarek składa się z czterech podstawowych układów funkcjonalnych (rys. 5.2):

- **układ uplastyczniający**
- **układ formujący**
- **układ napędowy**
- **układ sterowania**



Rys. 5.2. Schemat blokowy wylączarki

Układ uplastyczniający – jest to najważniejszy element każdej wylączarki, odpowiedzialny za przygotowanie tworzywa do dalszego formowania. Składa się on z:

- **leja zasypowego (zasobnika)** – miejsce, do którego wsypywany jest surowiec w postaci granulatu lub proszku,

⁵ K. Wilczyński (red.), *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.



- **cyindra grzewczego** – podzielonego na kilka stref temperaturowych (najczęściej 3–6), każda wyposażona w oddzielne grzałki opaskowe i czujniki temperatury,
- **ślimaka** – obracającego się wewnątrz cylindra, odpowiedzialnego za transport, sprężanie, mieszanie i uplastycznianie tworzywa,
- **układu chłodzenia** – służącego do stabilizacji temperatury, szczególnie w strefie zasobnika (przeciwdziałanie zbrylaniu się tworzywa) oraz, w niektórych rozwiązaniach, chłodzenia ślimaka od wewnątrz (np. cieczą lub powietrzem)⁶.

Główne zadania układu cylinder – ślimak:

- **Transport tworzywa** – surowiec jest przemieszczany wzdłuż cylindra w kierunku głowicy formującej ze stałą prędkością.
- **Mieszanie i homogenizacja** – ślimak zapewnia intensywne mieszanie tworzywa, umożliwiając uzyskanie jednorodnego rozkładu temperatury i składu chemicznego (np. dodatków barwiących, modyfikatorów).
- **Topienie i nagrzewanie** – tworzywo jest ogrzewane do temperatury przewidzianej dla danego polimeru, aż osiągnie stan uplastyczniony (tzw. lepki). Proces ten realizowany jest zarówno przez grzałki, jak i ciepło powstałe w wyniku tarcia mechanicznego.
- **Sprężanie materiału** – w końcowej strefie ślimaka tworzywo zostaje zagęszczone, a znajdujące się między cząstkami powietrze jest usuwane. Dodatkowo, generowane ciśnienie pozwala pokonać opory przepływu występujące przy przejściu tworzywa przez głowicę i ustnik.
- Nowoczesne ślimaki mają specjalnie ukształtowane strefy: zasilania, kompresji i homogenizacji, co pozwala optymalizować proces uplastyczniania różnych typów polimerów, także tych o dużej wrażliwości na przegrzanie⁷.

Układ napędowy odpowiada za wytwarzanie i przekazywanie momentu obrotowego na ślimak wytłaczarki. Składa się z następujących elementów:

- **silnik elektryczny** (najczęściej asynchroniczny lub serwo),
- **przekładnia redukcyjna** – zmniejsza prędkość obrotową silnika i zwiększa moment obrotowy,
- **sprzęgła elastyczne** – kompensują niewspółosiowość i tłumią drgania,
- **wał napędowy** – łączy układ napędowy z końcem ślimaka.
- W nowoczesnych wytłaczarkach stosuje się sterowanie prędkością obrotową silnika za pomocą falowników, co pozwala płynnie regulować wydajność i ciśnienie uplastycznianego tworzywa.

Układ sterowania pełni funkcję „mózgu” całego procesu wytłaczania. Umożliwia monitorowanie oraz regulację parametrów pracy wytłaczarki, takich jak:

- temperatura stref grzewczych cylindra i głowicy,
- prędkość obrotowa ślimaka,
- ciśnienie w głowicy,
- czas pracy, alarmy, blokady bezpieczeństwa.

W zależności od poziomu automatyzacji, układy sterowania mogą być:

- **manualne** – z prostymi termoregulatorami i pokrętlami,
- **półautomatyczne** – z podstawowym panelem operatorskim HMI,
- **automatyczne i zintegrowane** – z komputerem sterującym, ekranem dotykowym, zapisem danych, a nawet zdalnym dostępem i diagnostyką online.

Układ sterowania jest kluczowy dla zapewnienia powtarzalności, jakości i bezpieczeństwa procesu, gdzie błędne ustawienia mogą prowadzić do przegrzania materiału, uszkodzenia ślimaka lub wad produktu końcowego.

⁶ M. Strankowski, J. Gołąbek, K. Formela, J. Datta, *Podstawy technologii przetwórstwa*.

⁷ J. Pielichowski, A. Pruszyński, *Technologia tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2003.



Przebieg procesu wytłaczania

Proces wytłaczania polega na ciągłym przetwarzaniu materiału polimerowego w formie granulatu, proszku lub płatków w gotowy wyrób lub półwyrób o określonym kształcie np. profile, folie czy płyty. Materiał wsadowy trafia najpierw do leja zasypowego (zasobnika) wytłaczarki, skąd siłą grawitacji lub za pomocą urządzeń wspomagających, takich jak podajniki ślimakowe jest kierowany do cylindra urządzenia. Wewnątrz cylindra, dzięki obrotowemu ruchowi ślimaka, materiał jest stopniowo transportowany w kierunku głowicy. Proces ten, określany jako transport wleczony, rozpoczyna się jeszcze w stanie stałym, a następnie, po osiągnięciu strefy grzewczej, następuje jego uplastycznienie (czyli stopienie), a także homogenizacja zarówno pod względem składu, jak i temperatury. Ostatecznie uplastyczniony materiał zostaje wtłoczony do głowicy formującej, gdzie przechodząc przez usnik przyjmuje końcowy kształt⁸.

Strefa zasilania – transport materiału

W początkowym odcinku cylindra, który jest zwany strefą zasilania, tworzywo jest pobierane z leja i przesuwane w kierunku głowicy. Jednocześnie następuje jego wstępne zagęszczenie, czyli zmniejszenie objętości materiału na skutek nacisku i tarcia. Skuteczność transportu w tej strefie zależy od kilku kluczowych czynników:

- geometrii kanału ślimaka (głębokość i skok zwoju),
- prędkości obrotowej ślimaka,
- współczynnika tarcia materiału względem cylindra (powinien być jak najwyższy),
- oraz współczynnika tarcia tworzywa o ślimak (powinien być jak najniższy).

Zwiększenie ciśnienia w tej strefie ma zazwyczaj charakter wykładniczy, natomiast długość strefy zasilania ślimaka uzależniona jest od temperatury mięknięcia przetwarzanego tworzywa – im wyższa temperatura mięknięcia, tym dłuższy odcinek transportujący. W przypadku niektórych materiałów długość tej strefy można skrócić, stosując wstępne podgrzewanie materiału.

Strefa uplastycznienia

Kolejnym etapem jest strefa uplastyczniania, znana również jako strefa stapiania, w której tworzywo zmienia stan skupienia, ze stałego na uplastyczniony. Ciepło potrzebne do tego procesu pochodzi zarówno z grzałek umieszczonych na cylindrze, jak i z tarcia mechanicznego, wynikającego z ruchu materiału względem powierzchni cylindra i ślimaka oraz z tarcia wewnętrznych cząsteczek materiału. W idealnych warunkach cały proces stapiania powinien zakończyć się w tej właśnie strefie, co oznacza, że materiał w pełni uplastyczniony i odpowietrzony trafia do kolejnego etapu. Długość strefy sprężania ślimaka dobierana jest w zależności od właściwości termicznych tworzywa.

Strefa dozowania

W ostatniej fazie ślimaka, tzw. strefie dozowania, dochodzi do końcowego wyrównania temperatury i składu przetwarzanego tworzywa. Jeśli proces tego wymaga w tej strefie również następuje dalszy wzrost ciśnienia, potrzebny do przeciśnięcia materiału przez oporowy układ głowicy. W przeciwieństwie do strefy zasilania, tutaj wzrost ciśnienia ma zazwyczaj charakter liniowy. Efektywna praca strefy dozowania ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia powtarzalności kształtu oraz jakości powierzchni formowanego wyrobu.

⁸ K. Dobrosz, A. Matysiak, *Tworzywa sztuczne. Materiałoznawstwo i przetwórstwo*, WSiP, Warszawa 1994; K. Wilczyński (red.), *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*.



5.4. Wtryskiwanie tworzyw sztucznych

Technologia wtryskiwania polega na uplastycznieniu materiału polimerowego, a następnie wtłoczeniu go pod ciśnieniem do wnęki formy wtryskowej, która nadaje wyrobowi końcowemu pożądaną kształt. Kształt ten zostaje utrwalony dzięki procesowi chłodzenia formy, który prowadzi do zestalenia się tworzywa⁹. To jedna z najczęściej stosowanych metod przetwórstwa tworzyw termoplastycznych w skali przemysłowej.

Główne fazy procesu wtryskiwania:

1. Faza wtrysku - rozpoczyna się zamknięciem formy i przesunięciem elementu roboczego maszyny (ślimaka lub tłoka) w kierunku formy. W tym etapie uplastyczniony materiał jest dynamicznie wtłaczany do wnęki formującej.
2. Faza uplastyczniania - materiał wsadowy (najczęściej granulaty) jest pobierany, topiony i porcjowany. Tworzywo zostaje uplastycznione za pomocą nagrzewanych cylindrów i ruchu obrotowego ślimaka lub ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka. Gotowa porcja uplastycznego materiału zostaje przygotowana do kolejnego cyklu wtrysku.
3. Faza wyrzucania wypraski - po zestaleniu tworzywa następuje otwarcie formy oraz mechaniczne usunięcie gotowej kształtki za pomocą układu wyrzutników (np. prętów lub płyt wyrzutnikowych)¹⁰.

Metoda ta znajduje zastosowanie przy wytwarzaniu szerokiej gamy wyrobów z tworzyw termoplastycznych, takich jak: poliamid (PA), polistyren (PS), polietylen (PE), polichlorek winylu (PVC) oraz inne. Proces umożliwia produkcję elementów o bardzo zróżnicowanej masie (od mikroskopijnych detali poniżej 1 mg aż po komponenty przekraczające 10 kg). Czas trwania jednego cyklu produkcyjnego może wynosić od kilku sekund do nawet kilku minut, przy minimalnej konieczności obróbki wykańczającej.

Przykład zastosowania – wtryskarka ślimakowa

W wtryskarkach ze ślimakowym układem uplastyczniającym proces rozpoczyna się od podania tworzywa w postaci granulatu (lub rzadziej proszku) do leja zasypowego. Następnie materiał trafia do nagrzewanego cylindra, wewnątrz którego obraca się ślimak. W wyniku działania siły tarcia oraz ciepła przekazywanego z płaszcza grzewczego cylindra, granulaty ulegają stopieniu w trakcie transportu wzdłuż ślimaka.

W końcowej części cylindra formuje się tzw. poduszka stopionego tworzywa, która narastając powoduje cofanie się ślimaka. W momencie, gdy zgromadzona objętość uplastycznego tworzywa jest wystarczająca, ruch obrotowy ślimaka zostaje zatrzymany. W kolejnym etapie ślimak zostaje przesunięty do przodu (najczęściej za pomocą siłownika hydraulicznego), wtłaczając uplastczoną masę do wcześniej zamkniętej formy.

Wtrysk realizowany jest pod wysokim ciśnieniem (często przekraczającym 10 MPa), które utrzymywane jest do momentu, aż tworzywo ulegnie zestaleniu w formie lub przynajmniej w strefie wlewowej. Po zakończeniu procesu chłodzenia i otwarciu formy, gotowa wypraska zostaje usunięta ręcznie lub automatycznie, za pomocą układu wyrzutników¹¹.

Współczesne procesy formowania wyrobów metodą wtrysku nie ograniczają się jedynie do klasycznego cyklu uplastyczniania i tłoczenia tworzywa do formy. W zależności od rodzaju produktu, jego złożoności konstrukcyjnej i właściwości materiałowych, stosuje się różne odmiany technologii wtryskowej. Do najważniejszych technik wtryskiwania zalicza się:

⁹ PN-EN ISO 294-2:2002 – Tworzywa sztuczne. Wtryskiwanie kształtek do badań z tworzyw termoplastycznych. Część 2: Małe beleczki do prób rozciągania

¹⁰ H. Zawistowski, *Wtryskiwanie*, [w:] K. Wilczyński (red.), *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*.

¹¹ Tamże.



1. **Wtrysk sekwencyjny:** w tej metodzie tworzywo sztuczne jest podawane do wnęki formy za pośrednictwem kilku kanałów doprowadzających (tzw. dysz). Kluczowym elementem tej technologii jest możliwość sterowania kolejnością otwierania poszczególnych dysz, co umożliwia bardziej równomierne wypełnianie formy i ograniczenie powstawania zgrubień, naprężeń wewnętrznych oraz widocznych linii łączenia. Technika ta znajduje zastosowanie m.in. w produkcji dużych elementów o skomplikowanej geometrii¹².
2. **Wtrysk wielokomponentowy (wielomateriałowy):** proces ten polega na wtryskiwaniu do jednej formy dwóch lub więcej różnych rodzajów tworzywa, może to być np. połączenie materiału sztywnego z elastycznym, czy transparentnego z barwionym. Kolejne komponenty wypełniają formę w sposób zaprogramowany, tworząc wyroby o złożonej strukturze, np. z warstwami funkcyjnymi, uszczelkami lub estetycznym wykończeniem. Technologia ta umożliwia integrację kilku funkcji w jednym detalu, bez potrzeby dodatkowego montażu.
3. **Wtrysk z doprasowaniem (wtrysk kompresyjny):** w tym wariantcie technologii forma wyposażona jest w ruchome gniazdo, które działa w sposób teleskopowy. Po wtrysnięciu uplastycznionego tworzywa, gniazdo formy przemieszcza się, wywierając dodatkowy nacisk na tworzywo podczas jego chłodzenia. Proces ten pozwala uzyskać lepsze właściwości mechaniczne wypraski oraz wyższą dokładność wymiarową, zmniejszając ryzyko deformacji i zapadnięć.
4. **Wtrysk z rozdmuchiowaniem (hybrydowy proces wtryskowo-rozdmuchowy):** technika ta łączy klasyczne wtryskiwanie z późniejszym etapem rozdmuchu. Po wstępnym uformowaniu detalu, półprodukt z jeszcze niezestaloną masą zostaje przeniesiony (najczęściej automatycznie) do drugiej wnęki formy, gdzie poddawany jest rozdmuchiowaniu. Dzięki nadciśnieniu wewnętrznemu oraz chłodzeniu, kształt zostaje utrwalony zgodnie z geometrią formy rozdmuchowej. Technologia ta jest powszechnie stosowana w produkcji butelek, pojemników i innych pustych w środku elementów.

Wtryskiwanie to technika szeroko wykorzystywana w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym, elektrotechnicznym, a także w sektorze dóbr konsumpcyjnych. Dzięki precyzji wykonania, powtarzalności oraz możliwości uzyskiwania skomplikowanych kształtów, metoda ta stanowi podstawowe narzędzie w produkcji seryjnej i masowej. Dodatkową zaletą jest możliwość automatyzacji procesu i jego integracji z robotami przemysłowymi, co wpisuje się w założenia Przemysłu 4.0.

5.5. Przyszłość tworzyw sztucznych

Tworzywa sztuczne, mimo swoich licznych zalet użytkowych, stanowią poważne wyzwanie środowiskowe, zwłaszcza na etapie końca ich cyklu życia. W Polsce w przypadku odpadów komunalnych, udział odpadów polimerowych wynosi ok. 12-13% pod względem masy. Jednakże ze względu na niską gęstość właściwą materiałów tego typu, ich obecność w środowisku miejskim i przyrodniczym jest szczególnie łatwo zauważalna, ponieważ dominują wizualnie w porównaniu z innymi frakcjami odpadów. W skali krajowej szacuje się, że corocznie w Polsce generowanych jest około 1,5 miliona ton odpadów tworzyw sztucznych, przy czym znaczna część tego strumienia nie jest poddawana efektywnym metodom odzysku.

W odpowiedzi na te niepokojące statystyki Polska podejmuje działania w ramach zintegrowanej polityki odpadowej, zmierzającej do ograniczenia składowania tworzyw

¹² M. Strankowski, J. Gołąbek, K. Formela, J. Datta, *Podstawy technologii przetwórstwa*.



sztucznych oraz zwiększenia efektywności recyklingu i odzysku surowcowego. Perspektywicznie, dużą rolę odgrywać będą regulacje unijne oraz wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

Struktura odpadów z tworzyw sztucznych

Największy udział wśród wszystkich odpadów z polimerów mają opakowania z tworzyw sztucznych, które stanowią około 55% całego strumienia. W grupie tworzyw stosowanych do produkcji opakowań coraz większe znaczenie zyskują materiały, które ulegają rozkładowi w warunkach środowiska naturalnego. Szczególną rolę odgrywają tutaj polimery należące do grupy poliolefin, takie jak polietylen (PE) i polipropylen (PP), a także polistyren (PS) modyfikowane dodatkiem skrobi roślinnej. W zależności od zawartości skrobi w strukturze materiału, wyróżnia się dwa główne typy takich tworzyw:

1. Tworzywa sztuczne modyfikowane skrobią – skrobia wprowadzana jest do gotowego polimeru w postaci granulatu jako wypełniacz, zwykle w ilości 5-15% wagowych. Tego rodzaju materiały cechuje częściowa biodegradowalność, czyli biodegradacji ulega jedynie składnik naturalny, natomiast pozostała część materiału może zalegać w środowisku, rozpraszając się w postaci mikrocząstek.
2. Tworzywa oparte na skrobi jako głównym składniku polimerowym – zawartość skrobi wynosi tu od 40 do 60%, a mieszanina zawiera dodatkowo polimery polarne, takie jak polioctan winylu, kopolimery etylenu z kwasem akrylowym, alifatyczne poliestry, a także ich mieszaniny z PE. Takie materiały wykazują większy potencjał biodegradowalny.
3. Ciekawym przykładem tworzywa o pełnej podatności na biodegradację jest termoplastyczny octan celulozy, znany komercyjnie jako Bioceta®. Choć naturalnie rozkłada się powoli, to dzięki dodatkom plastyfikatorów pochodzenia roślinnego jego rozkład w środowisku może przebiegać znacznie szybciej. Bioceta jest materiałem transparentnym, który można przetwarzać w temperaturze około 170°C, wykorzystując technologie takie jak prasowanie, wytłaczanie z rozdmuchem czy kalandrowanie, co pozwala na uzyskanie folii oraz różnorodnych wyrobów opakowaniowych.
4. Innym rozwiązaniem ekologicznym jest wykorzystanie spienionej skrobi ziemniaczanej, kukurydzianej lub innej, które często są z dodatkiem naturalnych włókien. Takie materiały formuje się w pojemniki i naczynia jednorazowe, stosowane m.in. w gastronomii i przemyśle spożywczym. Po zużyciu mogą być one poddane spalaniu, kompostowaniu lub składowaniu, nie generując przy tym szkodliwych odpadów.
5. Szczególne miejsce wśród opakowaniowych tworzyw biodegradowalnych zajmują biopolimery o strukturze poliestrowej. Są to substancje uzyskiwane w procesie fermentacji cukrów (np. z buraków cukrowych) lub w wyniku fermentacyjnej polimeryzacji. Przykładami takich tworzyw są m.in. polihydroksymasłany (PHA), kwas polimlekowy (PLA) oraz kopolimery kwasu hydroksymasłowego i hydroksywalerianowego, znane pod nazwą handlową Biopol®. Biopol to jedno z nielicznych tworzyw, które pod wpływem naturalnych warunków ulega całkowitemu rozkładowi do dwutlenku węgla i wody, co czyni go wyjątkowo przyjaznym środowisku. Z tego materiału wytwarza się m.in. butelki, pojemniki, kanistry i inne opakowania jednorazowego użytku.

Pomimo rosnącego znaczenia i rozwoju technologii biodegradowalnych, główną barierą upowszechnienia tych tworzyw pozostaje ich wysoka cena. Koszt produkcji materiałów



biodegradowalnych bywa kilkakrotnie wyższy od tradycyjnych tworzyw sztucznych, co wynika m.in. z droższych surowców i mniejszej efektywności procesów przetwórczych¹³.

Znaczenie energetyczne i materiałowe odpadów polimerowych

Z punktu widzenia nowoczesnej inżynierii zasobów, odpady tworzyw sztucznych nie powinny być traktowane jako problem, lecz jako potencjalne źródło surowców wtórnych i energii. Dzięki wysokiej kaloryczności (ok. 40 MJ/kg), odpady polimerowe doskonale nadają się do wykorzystania w instalacjach do współspalania odpadów komunalnych lub w nowoczesnych elektrociepłowniach.

Należy jednak pamiętać, że recykling materiałowy (mechaniczny) powinien być zawsze preferowaną ścieżką, ponieważ pozwala on na bezpośrednie odzyskanie surowca i jego ponowne zastosowanie w procesach wytwórczych. Niestety, nie wszystkie odpady nadają się do takiego przetworzenia, np. te mocno zabrudzone lub trudne do rozdzielenia. Wówczas uzasadnione staje się ich wykorzystanie energetyczne, co jednocześnie zmniejsza zapotrzebowanie na konwencjonalne paliwa kopalne, takie jak węgiel czy gaz ziemny.

Kierunki rozwoju – „zero plastiku na składowiskach”

Europejski sektor tworzyw sztucznych podejmuje skoordynowane działania w celu całkowitego wyeliminowania składowania tego rodzaju odpadów. Kluczowym projektem w tym zakresie jest strategia „Zero plastics to landfills”¹⁴, której celem jest całkowite odejście od deponowania tworzyw sztucznych na wysypiskach do roku 2025. Warunkiem sukcesu jest pełne wdrożenie unijnego prawa odpadowego, obejmującego m.in. zakaz składowania odpadów palnych i możliwych do recyklingu.

Przyszłość tworzyw sztucznych – perspektywa inżynierska

W perspektywie najbliższych dekad tworzywa sztuczne, a szerzej materiały polimerowe, będą nadal odgrywały kluczową rolę w przemyśle i technice. Analiza trendów z ostatnich 20-30 lat wskazuje na stały rozwój nowych generacji polimerów, m.in. biotworzyw, polimerów samonaprawialnych, kompozytów hybrydowych oraz tworzyw o właściwościach funkcjonalnych (np. przewodzących prąd, odpornych na promieniowanie UV czy termoplastycznych o pamięci kształtu¹⁵).

W kontekście inżynierii mechanicznej i budowy maszyn, coraz większego znaczenia nabierają polimery konstrukcyjne o wysokiej wytrzymałości, stosowane jako alternatywa dla metali w aplikacjach obciążeniowych, zwłaszcza tam, gdzie istotna jest redukcja masy, odporność korozyjna czy elastyczność projektowa. Tabela 5.3 porównuje trzy kluczowe grupy materiałów polimerowych: tworzywa konwencjonalne (na bazie ropy), biotworzywa, oraz kompozyty/nanokompozyty polimerowe – uwzględniając ich właściwości, zalety, ograniczenia i przykłady zastosowań.

¹³ J. Szostak-Kotowa, *Opakowania z tworzyw sztucznych rozkładanie w środowisku*, „Opakowanie” 2000, (11), s. 18-20.

¹⁴ Zero plastiku na składowiskach - chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/01/Zero_Plastics_to_landfill_OnePager_Sept_2019.pdf (dostęp 10.05.2025)

¹⁵ M. Kozłowski, P. Wypych, K. Pielichowski, *Nanokompozyty w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2023.

Tabela 5.3. Porównanie wybranych materiałów polimerowych

Typ materiału	Źródło surowca	Główne cechy	Zalety	Ograniczenia	Przykłady zastosowań
Konwencjonalne tworzywa sztuczne	Surowce kopalne (ropa, gaz)	Wysoka wytrzymałość, odporność chemiczna, łatwość formowania	Szeroka dostępność, niska cena, dobre właściwości mechaniczne	Wysoka emisja CO ₂ w produkcji, brak biodegradowalności	Opakowania, części samochodowe, AGD, narzędzia, izolacje
Biotworzywa (biopolimery)	Odnawialne źródła (biomasa, odpady rolnicze)	Częściowo lub całkowicie biodegradowalne, mniejszy ślad węglowy	Przyjazne środowisku, możliwa kompostowalność, rozwój gospodarki obiegu zamkniętego	Niższa odporność na temperaturę i wilgoć, wyższe koszty produkcji	Opakowania spożywcze, folie, tacki, implanty biodegradowalne
Kompozyty i nanokompozyty polimerowe	Tworzywa sztuczne + dodatki (włókna, nanocząstki)	Zwiększona wytrzymałość, sztywność, funkcjonalność (np. przewodnictwo)	Możliwość dostosowania do konkretnych potrzeb technicznych, lekkość, trwałość	Złożony proces produkcji, trudności w recyklingu, wysoki koszt niektórych nanonapełniaczy	Lotnictwo, motoryzacja, sprzęt sportowy, elementy konstrukcyjne, elektronika elastyczna

Źródło: <https://plasticseurope.org/fr/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview/>

Z perspektywy kilkunastu najbliższych lat, tworzywa sztuczne, a szerzej: materiały inżynierskie oparte na strukturach polimerowych nie tylko utrzymają swoją pozycję w przemyśle, ale również odegrają zasadniczą rolę w reakcji na globalne wyzwania cywilizacyjne. Wynika to z ich uniwersalności konstrukcyjnej, możliwości funkcjonalizacji oraz adaptacji do nowych technologii. Dynamiczny rozwój obserwowany w sektorze materiałów polimerowych wpisuje się w kontekst tzw. megatrendów, czyli procesów o zasięgu globalnym, które mają potencjał przemodelowania całych gałęzi przemysłu i stylu życia:

- wzrost liczby ludności i zmieniająca się struktura demograficzna,
- intensywna urbanizacja oraz globalizacja gospodarki,
- zmiany klimatyczne i deficyt energetyczny,
- przełomowe innowacje w ochronie zdrowia i bezpieczeństwie konsumentów,
- przyspieszenie cyfryzacji i integracji systemów mechatronicznych.

Elektronika przyszłości – polimery w fotowoltaice i magazynowaniu energii

Szczególnie obiecującym kierunkiem rozwoju są materiały przewodzące prąd, będące częścią grupy tzw. polimerów funkcjonalnych. Znajdują one zastosowanie m.in. w:

- nowoczesnych ogniwach fotowoltaicznych,
- drukowanych układach elektronicznych (technologie OLED i QLED),
- biosensorach monitorujących parametry biologiczne,
- elastycznych bateriach i superkondensatorach.

Rozwiązaniem, na które warto zwrócić uwagę są polimerowe ogniwa fotowoltaiczne, których sprawność energetyczna przekracza obecnie 10%. Dzięki możliwości nadruku cienkowarstwowego na elastyczne podłoża, możliwe jest tworzenie lekkich, mobilnych instalacji solarnych montowanych np. na fasadach, pojazdach lub sprzęcie osobistym. Technologia ta wyróżnia się nie tylko niskim kosztem produkcji, ale również łatwością



integracji z innymi elementami konstrukcyjnymi, co może mieć znaczenie dla rozwoju autonomicznych urządzeń zasilanych energią słoneczną.

Materiały kompozytowe i nanotechnologia - nowa jakość tworzyw konstrukcyjnych

W obszarze zastosowań inżynierskich szczególną rolę odgrywają tworzywa wzmacniane nanocząstkami i włóknami, które z powodzeniem zastępują metale w licznych aplikacjach mechanicznych. Przykłady to:

- kompozyty węglowe i szklane stosowane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym,
- nanopolimery przewodzące ciepło i prąd,
- materiały samonaprawialne i reagujące na bodźce zewnętrzne (tzw. *smart materials*)¹⁶.

Zastosowanie nanododatzków, takich jak nanorurki węglowe, tlenki metali, grafen, czy nanosrebro, pozwala na uzyskanie zupełnie nowych właściwości mechanicznych, optycznych, antybakteryjnych czy barierowych. Kompozyty tego typu znajdują zastosowanie nie tylko w przemyśle, ale również w nowoczesnej medycynie, np. w implantach, protezach czy mikroczujnikach.

Surowce przyszłości – tworzywa bio- i CO₂-pochodne

W kontekście globalnych wysiłków na rzecz redukcji emisji CO₂ oraz przejścia na gospodarkę niskoemisyjną, istotne znaczenie ma zmiana podejścia do źródeł surowców wykorzystywanych do produkcji tworzyw. Obecnie ponad 99% tworzyw sztucznych powstaje z ropy naftowej lub gazu ziemnego. Jednakże coraz większy nacisk kładzie się na opracowanie alternatywnych technologii produkcji polimerów z:

- biomasy roślinnej (np. skrobia, celuloza, odpady rolnicze),
- olejów roślinnych,
- dwutlenku węgla (CO₂) jako substratu chemicznego.

Szczególnie obiecujący jest kierunek syntezy tworzyw z CO₂, który łączy zalety niezależności od paliw kopalnych z ograniczaniem emisji gazów cieplarnianych. Już teraz prowadzone są prace nad polimerami otrzymywanymi w wyniku katalitycznej konwersji CO₂ z epoksydami.

Tworzywa sztuczne, mimo rosnących wymagań regulacyjnych i presji ekologicznej, pozostają jednym z najważniejszych materiałów inżynierskich współczesności. Dzięki swojej wszechstronności:

- przyczyniają się do obniżenia masy konstrukcji i oszczędności energii,
- umożliwiają wdrażanie technologii cyfrowych i energooszczędnych,
- wpisują się w idee gospodarki o obiegu zamkniętym.

Ich przyszłość związana będzie z dalszym rozwojem recyklingu, kompozytów, biotworzyw i polimerów funkcjonalnych, co pozwoli nie tylko sprostać wyzwaniom technologicznym, ale również zmniejszyć wpływ na środowisko naturalne. Dla inżyniera mechanika oznacza to konieczność rozszerzenia wiedzy materiałowej oraz umiejętności pracy z nowoczesnymi technologiami przetwórstwa tworzyw, co czyni ten obszar jednym z kluczowych komponentów współczesnej edukacji technicznej.

5.6. Przykłady badań

Tworzywa sztuczne, jako materiały szeroko stosowane w inżynierii mechanicznej, muszą spełniać określone wymagania użytkowe, technologiczne i środowiskowe. Ich trwałość, niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacyjne zależą w dużej mierze od właściwości fizykochemicznych, które mogą ulegać zmianom pod wpływem czynników zewnętrznych.

¹⁶ Z. Jamshidiann i in., *Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies*, „Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety” 2010, 9(5), 552–57.



Dlatego istotnym etapem oceny jakości tych materiałów są specjalistyczne badania, pozwalające określić ich odporność chemiczną, wytrzymałość mechaniczną, twardość oraz gęstość¹⁷. W tym rozdziale przedstawione zostaną najważniejsze metody badań właściwości chemicznych i mechanicznych tworzyw sztucznych, stosowane zarówno w procesach kontroli jakości, jak i podczas projektowania wyrobów z polimerów. Omówione zostaną m.in.:

- odporność tworzyw na działanie czynników chemicznych (np. kwasów, zasad, rozpuszczalników organicznych),
- podstawowe badania wytrzymałościowe, w tym próby rozciągania, zginania i udarności,
- oznaczanie twardości metodą Shore’a i Rockwella,
- metody wyznaczania gęstości, które umożliwiają identyfikację rodzaju tworzywa oraz kontrolę spójności strukturalnej materiału.

Zrozumienie znaczenia i interpretacji wyników tych badań ma kluczowe znaczenie dla przyszłych inżynierów mechaników, szczególnie w kontekście doboru odpowiednich materiałów polimerowych do konkretnych zastosowań w budowie maszyn i urządzeń technicznych.

Odporność chemiczna tworzyw sztucznych

Odporność chemiczna tworzyw sztucznych to zdolność materiału do zachowania swoich właściwości fizykochemicznych pod wpływem oddziaływania substancji chemicznych, takich jak kwasy, zasady, alkohole, oleje, paliwa, a także rozpuszczalniki organiczne. Właściwość ta jest kluczowa w zastosowaniach przemysłowych, gdzie elementy wykonane z tworzyw sztucznych są ekspozowane na działanie agresywnych mediów. Badania odporności chemicznej przeprowadza się najczęściej zgodnie z normami (np. PN-EN ISO 175), polegają one na zanurzeniu próbek w określonej cieczy chemicznej przez zdefiniowany czas i temperaturę, a następnie ocenie zmian masy, wymiarów oraz właściwości mechanicznych. Analizuje się również ewentualne zmętnienie, pęknięcia, spęczenia lub odbarwienia.

Odporność chemiczna zależy m.in. od rodzaju polimeru, jego struktury chemicznej, obecności domieszek i wypełniaczy oraz od temperatury i czasu oddziaływania czynnika chemicznego. Na przykład:

- **polietyleny (PE)** i **polipropyleny (PP)** wykazują dobrą odporność na większość kwasów i zasad, ale są mniej odporne na silne utleniacze,
- **poliwęglany (PC)** są wrażliwe na działanie rozpuszczalników aromatycznych,
- **PVC** dobrze znosi działanie kwasów, ale może ulec degradacji pod wpływem estrów i ketonów.

Przykład 1

Cel doświadczenia: celem doświadczenia jest ocena odporności chemicznej wybranych tworzyw sztucznych na działanie różnych czynników chemicznych reprezentujących kwasy, zasady i związki utleniające. Analiza zmian powierzchniowych umożliwia określenie podatności danego materiału na degradację chemiczną.

Wypożyczenie i materiały:

- Próbki różnych tworzyw sztucznych (np. PE, PP, PVC, PS, PA, PC)
- Odczynniki chemiczne:
 - roztwór kwasu solnego (HCl, stężony lub rozcieńczony)
 - roztwór kwasu siarkowego (H₂SO₄)
 - roztwór wodorotlenku sodu (NaOH)
- Pipety Pasteura lub pędzelki laboratoryjne

¹⁷ H. Kaczmarek, *Tworzywa sztuczne. Struktura, właściwości, przetwórstwo*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.



- Tygiel porcelanowy (1 szt. na próbkę)
- Oznaczniki lub markery do opisu próbek
- Okulary ochronne
- Rękawice ochronne (nitrylowe lub lateksowe)
- Karta obserwacji (do zapisania wyników)

Zasady BHP

1. Pracuj wyłącznie w rękawicach i okularach ochronnych.
2. Unikaj kontaktu chemikaliów ze skórą i oczami.
3. Pracuj na stabilnym blacie pokrytym matą ochronną.
4. Po zakończeniu doświadczenia dokładnie umyj ręce i zdezynfekuj miejsce pracy.
5. Zużyte próbki oraz nadmiar odczynników utylizuj zgodnie z obowiązującymi przepisami.

Przebieg doświadczenia

1. Przygotowanie próbek

Wybierz 3–5 próbek wykonanych z różnych rodzajów tworzyw sztucznych.

Oznacz je trwale (np. markerem), każda próbka powinna mieć unikalny kod lub numer.

Umieść próbki na powierzchni roboczej.

2. Nakładanie odczynnika chemicznego

Za pomocą pipety lub pędzelka nałóż jedną kroplę wybranego odczynnika na środek powierzchni każdej próbki.

Dla każdej grupy próbek użyj innego odczynnika (np. HCl, H₂SO₄, NaOH).

Zapisz, który odczynnik został zastosowany do której próbki.

3. Obserwacja reakcji (1. etap)

Obserwuj zmiany na powierzchni próbek przez pierwsze 2–3 minuty po nałożeniu odczynnika.

Zwróć uwagę na:

- zmianę koloru,
- pęcznienie, spienienie lub pękanie powierzchni,
- zmętnienie, rozpuszczanie lub odbarwienie.

4. Przykrycie próbek tygłem porcelanowym

Po wstępnej obserwacji, delikatnie przykryj każdą próbkę tygłem porcelanowym.

Upewnij się, że tygiel przylega do powierzchni próbki i zapobiega parowaniu odczynnika.

5. Obserwacja reakcji (2. etap)

Po kolejnych 5-10 minutach ostrożnie unieś tygiel i ponownie dokonaj obserwacji próbek.

Zanotuj wszelkie dodatkowe zmiany powierzchniowe, które zaszły pod wpływem dłuższego kontaktu z odczynnikiem.

6. Analiza wyników

Porównaj wyniki obserwacji dla każdej próbki przed i po przykryciu tygłem porcelanowym.

Oceń odporność chemiczną na podstawie skali ocen poniżej. Zanotuj wynik dla każdej próbki i każdego odczynnika w tabeli.

Tabela 5.4. Skala ocen odporności chemicznej tworzyw sztucznych

Ocena (stopień zmian)	Opis zmian powierzchni
5	brak widocznych zmian
4	lekka zmiana wyglądu (np. delikatne zmatowienie, powierzchniowe odbarwienie)
3	nieznaczny ślad, widoczny pod różnymi kątami obserwacji (np. pełny krążek)
2	silny ślad, struktura powierzchni w znacznej mierze pozostaje nienaruszona
1	silny ślad, znaczne zmiany strukturalne powierzchni (np. spękania, deformacja)



Wnioski

1. Sporządź krótką analizę odporności każdego z badanych tworzyw na poszczególne odczynniki.
2. Wskaż, które tworzywa wykazały największą stabilność chemiczną, a które uległy znaczącym zmianom.
3. Porównaj uzyskane wyniki z literaturowymi danymi dotyczącymi odporności chemicznej badanych tworzyw.
4. Oceń, które tworzywa nadają się do zastosowań w środowiskach agresywnych chemicznie (np. w przemyśle chemicznym, sanitarnym, AGD).

Tabela 5.5. Tabela wyników

Nr próbki	Rodzaj tworzywa	Zastosowany odczynnik	Ocena przed przykryciem	Ocena po przykryciu	Średnia ocena	Wnioski
1	PE-HD (polietylen wysokiej gęstości)	HCl (10%)	5	5	5,0	Brak zmian; bardzo dobra odporność chemiczna
2	PVC (polichlorek winylu)	H ₂ SO ₄ (stężony)	4	3	3,5	Widoczne odbarwienie i lekkie zmatowienie
3	PS (polistyren)	NaOH (10%)	3	2	2,5	Znaczne zmatowienie, zmiany struktury powierzchni
4	PC (poliwęglan)	HCl (10%)	4	3	3,5	Powierzchniowe spękania, podatność na degradację
5	PP (polipropylen)	NaOH (10%)	5	5	5,0	Brak widocznych zmian, bardzo dobra odporność

Analiza wyników i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji można zauważyć istotne różnice w odporności chemicznej pomiędzy badanymi tworzywami sztucznymi:

- **Polietylen (PE-HD)** oraz **polipropylen (PP)** wykazały bardzo dobrą odporność na działanie roztworów kwasu solnego i zasady sodowej. Ich powierzchnie pozostały niezmiennione zarówno przed, jak i po przykryciu tygłem, co jest zgodne z literaturowymi danymi wskazującymi na dużą odporność chemiczną tych poliolefin.
- **Polichlorek winylu (PVC)** pod wpływem stężonego kwasu siarkowego uległ nieznacznemu zmatowieniu i odbarwieniu, co może być związane z częściową degradacją powierzchni, szczególnie w warunkach ograniczonego parowania odczynnika.
- **Polistyren (PS)** oraz **poliwęglan (PC)** wykazały ograniczoną odporność. PS uległ widocznym zmianom powierzchni, co świadczy o jego podatności na działanie silnych zasad. W przypadku PC obserwowano mikropęknięcia powierzchni, które mogą prowadzić do degradacji mechanicznej przy dłuższej ekspozycji chemicznej.

Wnioski ogólne

1. Tworzywa o strukturze niepolarnych łańcuchów (PE, PP) są odporne na wiele czynników chemicznych.
2. Materiały amorficzne (np. PC, PS) mogą być wrażliwe na kontakt z wybranymi kwasami i zasadami, szczególnie w warunkach ograniczonej wymiany gazowej.



3. Analiza wizualna jest skuteczną metodą oceny wstępnej odporności chemicznej, jednak dla dokładnych wyników wymagane są również pomiary ilościowe (np. zmiany masy, wytrzymałości).

Twardość tworzyw sztucznych – metody Shore’a i Rockwella

Twardość to opór, jaki materiał stawia przeciwko wciskaniu ciała obcego. W przypadku tworzyw sztucznych, najczęściej stosuje się:

- **Metodę Shore’a (PN-EN ISO 868)** – używana do pomiaru twardości elastomerów i miękkich tworzyw termoplastycznych. Wyróżnia się dwie skale:
 - **Shore A** – do miękkich materiałów (np. gumy, TPE),
 - **Shore D** – do twardszych tworzyw (np. PE-HD, ABS, PC).

Pomiar polega na wciskaniu stalowego trzpienia zakończonego określonym końcem w próbkę i odczycie twardości w skali od 0 do 100.

- **b) Metoda Rockwella (PN-EN ISO 2039-2)** – w tej metodzie wciska się kulkę stalową lub stożek diamentowy pod określonym obciążeniem i mierzy głębokość odkształcenia. Stosowana jest głównie dla twardszych tworzyw technicznych.

Oznaczanie gęstości tworzyw sztucznych

Gęstość (ρ) tworzyw sztucznych to stosunek masy do objętości i jest jednym z podstawowych parametrów identyfikujących dany materiał. Pomiar gęstości umożliwia:

- ocenę zgodności z dokumentacją materiałową,
- wykrycie zanieczyszczeń lub błędów w produkcji (np. pęcherzyków powietrza),
- identyfikację rodzaju polimeru w przypadku braku oznaczeń.

Najczęściej stosowaną metodą laboratoryjną jest metoda hydrostatyczna (zgodna z normą PN-EN ISO 1183), polegająca na ważeniu próbki w powietrzu i zanurzonej w cieczy (najczęściej wodzie). Zastosowanie prawa Archimidesa pozwala na wyznaczenie gęstości z dużą dokładnością.

Przykładowe wartości gęstości wybranych tworzyw:

- Polietylen (PE-LD): 0,91–0,94 g/cm³
- Polipropylen (PP): 0,90–0,91 g/cm³
- Poliamid (PA6): 1,13–1,15 g/cm³
- Poli(metakrylan metylu) (PMMA): 1,18–1,20 g/cm³
- Poliwęglan (PC): 1,20–1,22 g/cm³

Przykład 2

Cel ćwiczenia: celem ćwiczenia jest wyznaczenie gęstości różnych tworzyw sztucznych poprzez pomiar ich masy i objętości. Badanie to pozwala na identyfikację materiałów oraz kontrolę jakości ich struktury.

Podstawy teoretyczne

1. Gęstość (ρ) to stosunek masy do objętości danego ciała:

$$\rho = m / V \text{ (g/cm}^3\text{)},$$

gdzie: m – masa próbki (g),

V – objętość próbki (cm³).

2. Temperatura pomiaru gęstości zaznaczona jest zawsze w indeksie dolnym symbolu gęstości, np. $\rho_{25} = 1,14 \text{ g/cm}^3$ lub $d_{25} = 1,14 \text{ g/cm}^3$, co oznacza, że temperatura pomiaru wynosi 25°C.

3. Wyposażenie stanowiska

- Waga elektroniczna (dokładność min. 0,01 g)



- Suwmiarka (dokładność min. 0,1 mm)
- Próbkę tworzywa o regularnym kształcie (pręty, sześciany, wałki)
- Cylinder miarowy (dla metody wypierania cieczy – alternatywa)
- Woda destylowana (opcjonalnie – dla metody wypierania)
- Termometr pokojowy

Przebieg ćwiczenia (metoda objętościowo-masowa)

Krok 1: Pomiar masy

Zważ próbkę tworzywa na wadze laboratoryjnej. Zapisz wynik z dokładnością do 0,01 g.

Krok 2: Pomiar wymiarów geometrycznych

Za pomocą suwmiarki zmierz:

- dla prostopadłościanu: długość (a), szerokość (b), wysokość (h)
- dla walca: średnicę (d) i wysokość (h)

Krok 3: Obliczenie objętości

Dla prostopadłościanu:

$$V = a \cdot b \cdot h$$

Dla walca:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h$$

Krok 4: Obliczenie gęstości

Podstaw uzyskane wartości masy i objętości do wzoru:

$$\rho = m / V \quad (\text{g/cm}^3)$$

Próbka: walec z tworzywa sztucznego (PE-HD)

Masa próbki: m – 4,30 g

Średnica: d – 12,0 mm-1,20 cm

Wysokość: h = 3,0 cm

Obliczenie objętości:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{1,20}{2}\right)^2 \cdot 3 = \pi \cdot (0,60)^2 \cdot 3 \approx 3,39 \text{ cm}^3$$

Obliczenie gęstości:

$$\rho = 4,30 / 3,39 \approx 1,27 (\text{g/cm}^3)$$

Wynik: Gęstość próbki wynosi około 1,27 g/cm³.

Na podstawie tej wartości można podejrzewać, że próbka może być wykonana np. z PVC (jeśli szacowana gęstość mieści się w zakresie 1,20–1,40 g/cm³), ale konieczne jest porównanie z danymi literaturowymi.

Uwagi praktyczne i błędy pomiarowe

- Dokładność pomiaru masy i wymiarów ma istotny wpływ na końcowy wynik gęstości.
- Powierzchnia próbki powinna być czysta i sucha.
- Próbkę powinny mieć kształty geometryczne pozwalające na precyzyjne określenie objętości (np. walec, sześciąt).
- Gęstość tworzyw sztucznych zmienia się z temperaturą – pomiary powinny być wykonywane w temperaturze pokojowej (20-25°C).

Wariant alternatywny – metoda wypierania cieczy

Jeśli próbki mają nieregularny kształt, można zastosować metodę wypierania cieczy:

$$\rho = m / (V_2 - V_1) \quad (\text{g/cm}^3)$$

gdzie:

m – masa próbki

V₁ – objętość cieczy przed zanurzeniem

V₂ – objętość cieczy po zanurzeniu próbki



Pomiar gęstości jest prostym i skutecznym sposobem identyfikacji tworzyw sztucznych oraz oceny ich jakości. Otrzymane wyniki można porównać z wartościami referencyjnymi zawartymi w tabelach materiałowych. Badanie to ma duże znaczenie w kontroli jakości tworzyw i weryfikacji dostaw surowca do przetwórstwa.



Bibliografia

- Dobrosz K., Matysiak A., *Tworzywa sztuczne. Materialoznawstwo i przetwórstwo*, WSiP, Warszawa 1994.
- Jamshidian Z., Tehrani E.A., Imran M., Jacquot M., Desobry S., *Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies*, „Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety” 2010, 9(5), 552–571.
- Kaczmarek H., *Tworzywa sztuczne. Struktura, właściwości, przetwórstwo*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- Kozłowski M., Wypych P., Pielichowski K., *Nanokompozyty w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2023.
- Pielichowski J., Pruszyński A., *Technologia tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2003.
- Stasiek J., *Wytłaczanie tworzyw polimerowych. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2007.
- Strankowski M., Gołabek J., Formela K., Datta J., *Podstawy technologii przetwórstwa materiałów polimerowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2024.
- Szostak-Kotowa J., *Opakowania z tworzyw sztucznych rozkładanie w środowisku*, „Opakowanie” 2000, (11), s. 18-20.
- Wilczyński K. (red.), *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- Zawistowski H., *Wtryskiwanie*, [w:] *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, K. Wilczyński (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- PN-EN ISO 294-2:2002 – Tworzywa sztuczne. Wtryskiwanie kształtek do badań z tworzyw termoplastycznych. Część 2: Małe beleczki do prób rozciągania.
- PN-EN ISO 175 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie odporności chemicznej.
- PN-EN ISO 868 – Tworzywa sztuczne i elastomery – Oznaczanie twardości metodą Shore’a.
- PN-EN ISO 1183 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie gęstości.

Źródła internetowe

- <https://www.statista.com/statistics/987838/plastics-production-volume-in-the-eu-28/> (dostęp 28.04.2025)
- <https://plasticseurope.org/pl/knowledge-hub/branza-tworzyw-sztucznych-2024/> (dostęp 28.04.2025)
- <https://plasticseurope.org/pl/2023/05/24/rynek-tworzyw-sztucznych-w-polsce-i-europie-wysoka-srednia-roczna-stop-a-wzrostu-ale-nizsze-tempo-od-polowy-2022-roku/> (dostęp 28.04.2025)
- https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2023/10/Tworzywa-fakty-w-pigulce-2023_PL.pdf (dostęp 28.04.2025)
- chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclefindmkaj/https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/01/Zero_Plastics_to_landfill_OnePager_Sept_2019.pdf (dostęp 10.05.2025)
- <https://plasticseurope.org/fr/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview/> (dostęp 10.05.2025)