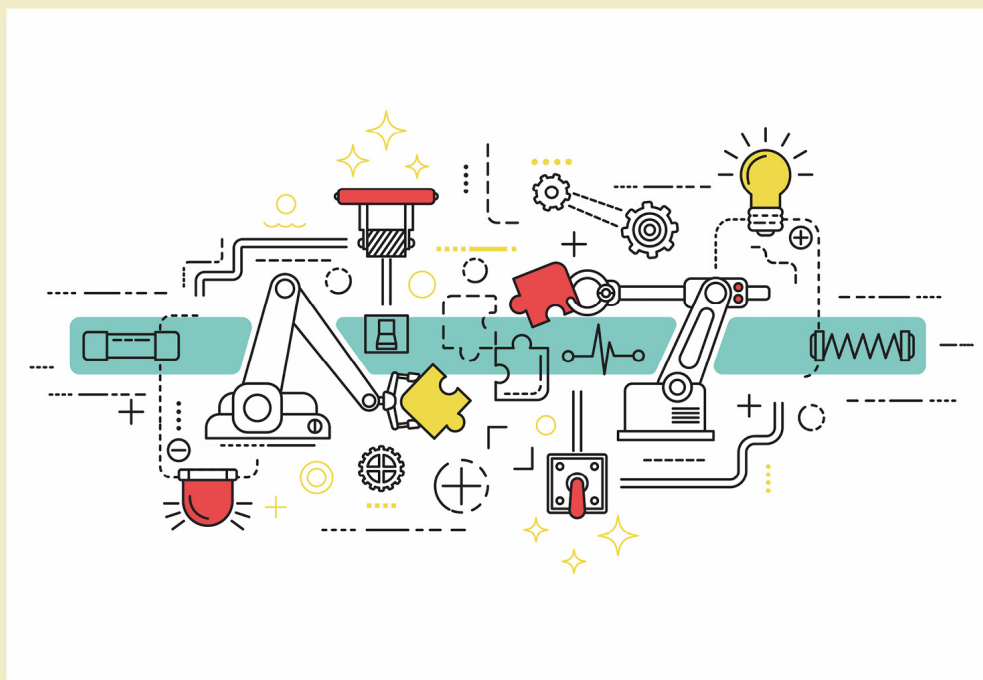




*Anna Rudawska, Jacek Domińczuk,
Izabela Miturska-Barańska, Elżbieta Doluk,
Jakub Szabelski, Arkadiusz Gola*

Podstawy technologii montażu

Ćwiczenia laboratoryjne



P
O
D
D
R
E
C
Z
N
I
K
I

Podstawy technologii montażu

Ćwiczenia laboratoryjne



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDZIAŁ
MECHANICZNY

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Anna Rudawska

Jacek Domińczuk

Izabela Miturska-Barańska

Elżbieta Doluk

Jakub Szabelski

Arkadiusz Gola

Podstawy technologii montażu

Ćwiczenia laboratoryjne



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2023

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jan Żurek, Politechnika Poznańska

dr hab. inż. Andrzej Komorek, Lotnicza Akademia Wojskowa

O ile nie wskazano inaczej, rysunki stanowią opracowanie własne autorów podręcznika.

Na okładce wykorzystano obraz autorstwa macrovector ze strony freepik.com

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

ISBN: 978-83-7947-575-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.wpl.pollub.pl

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl
Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie	9
Abstract	10
Przedmowa	11
Wprowadzenie	13
1. Montaż selekcyjny	19
1.1. Istota montażu selekcyjnego	19
1.2. Zalety i wady montażu selekcyjnego	25
1.3. Wykonanie ćwiczenia	27
Bibliografia	36
2. Połączenia czopowo-cierne	37
2.1. Technologia połączeń czopowo-ciernych bezpośrednich	38
2.2. Charakterystyka wybranych właściwości mechanicznych połączeń wciskowych	38
2.3. Wykonanie ćwiczenia	44
Bibliografia	44
3. Połączenia klejowe metali i stopów metali	45
3.1. Charakterystyka procesu klejenia	50
3.2. Wpływ czynników konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych	58
3.3. Typy połączeń klejowych	61
3.4. Rodzaje klejów konstrukcyjnych	64
3.5. Projektowanie i wytrzymałość połączeń klejowych	65
3.6. Wykonanie ćwiczenia	67
Bibliografia	69
4. Montaż łożysk tocznych	70
4.1. Warunki techniczne montażu łożysk tocznych	70
4.2. Montaż zespołu wał-łożysko, łożysko-obudowa	72
4.3. Zasady montażu łożysk stożkowych	77
4.4. Sprawdzanie poprawności osadzenia łożysk kulkowych	79

4.5. Wykonanie ćwiczenia	81
Bibliografia	91
5. Montaż przekładni zębatych	92
5.1. Montaż przekładni zębatych	93
5.2. Wykonanie ćwiczenia	100
Bibliografia	102
6. Połączenia klejowe tworzyw polimerowych	103
6.1. Zalety i ograniczenia stosowania połączeń klejowych	103
6.2. Przebieg procesu klejenia	105
6.3. Połączenia klejowe tworzyw polimerowych	108
6.4. Wytrzymałość połączeń klejowych	109
6.5. Technologia połączeń klejowych tworzyw polimerowych	110
6.6. Wykonanie ćwiczenia	111
Bibliografia	113
7. Regeneracja elementów maszyn za pomocą polimerowych mas regeneracyjnych	114
7.1. Pojęcia związane z regeneracją	115
7.2. Zalety i wady regeneracji za pomocą materiałów adhezyjnych	117
7.3. Technologia wykonania napraw typowych uszkodzeń elementów maszyn	118
7.4. Przebieg ćwiczenia	125
Bibliografia	127
8. Połączenia nitowe	128
8.1. Nitowanie	128
8.2. Rodzaje połączeń nitowych	130
8.3. Rodzaje nitów	131
8.4. Narzędzia do procesu nitowania	133
8.5. Obliczenia połączeń nitowych	135
8.6. Przebieg ćwiczenia	142
Bibliografia	142

9. Połączenia lutowane i zgrzewane	143
9.1. Charakterystyka procesu lutowania	143
9.2. Rodzaje lutowania	144
9.3. Połączenia zgrzewane	148
9.4. Charakterystyka wybranych rodzajów zgrzewania	148
9.5. Przebieg ćwiczenia	149
Bibliografia	150
10. Konstrukcja i technologia połączeń klejowych cylindrycznych	151
10.1. Konstrukcja i technologia połączeń klejowych współosiowych	151
10.2. Obliczenia wytrzymałości połączeń klejowych współosiowych	153
10.3. Technologia wykonania klejowych połączeń współosiowych	155
10.4. Przebieg ćwiczenia	155
Bibliografia	159
11. Inżynieria zabezpieczania połączeń śruba–nakrętka	160
11.1. Definicje	160
11.2. Połączenia gwintowe	160
11.3. Zabezpieczenia przed samoodkręcaniem się gwintów poprzez klejenie	161
11.4. Środki do zabezpieczania gwintów	162
11.5. Wytrzymałość na zerwanie połączeń śrubowych	164
11.6. Etapy zabezpieczenia połączeń śruba–nakrętka	165
11.7. Klucze graniczne i dynamometryczne	166
11.8. Przebieg ćwiczenia	167
Bibliografia	169
Wzór sprawozdania	170

Podstawy technologii montażu

Streszczenie

Podręcznik składa się z jedenastu rozdziałów. Omówiono w nich podstawowe zagadnienia związane z montażem wybranych zespołów montażowych oraz wybrane metody łączenia elementów maszyn i urządzeń. Zamieszczono charakterystykę wybranych metod montażu w zależności od wielkości produkcji, organizacji i wyposażenia technologicznego zakładu, tj. montażu z całkowitą (pełną) zamiennością, z zastosowaniem selekcji, z zastosowaniem kompensacji oraz z indywidualnym dopasowaniem składanych elementów, natomiast szczegółowo omówiono zasady montażu selekcyjnego. Przedstawiono charakterystykę i zasady wykonywania połączeń: czopowo-ciernych, klejowych metali i ich stopów oraz tworzyw polimerowych, nitowych lutowanych, zgrzewanych oraz gwintowych. Zamieszczono zasady montażu łożysk tocznych, przekładni zębatych oraz połączeń klejowych cylindrycznych. Zaprezentowano zagadnienia regeneracji elementów maszyn za pomocą polimerowych mas regeneracyjnych, w tym opis wykonania przykładowej naprawy za pomocą regeneracyjnych mas polimerowych oraz porównanie wytrzymałości elementu poddanego regeneracji oraz elementu nieuszkodzonego.

Słowa kluczowe: montaż, metody montażu, metody łączenia elementów, połączenia czopowo-cierne, połączenia klejowe, połączenia nitowe, połączenia lutowane, połączenia zgrzewane, połączenia gwintowane, regeneracja, polimerowe masy regeneracyjne

Essentials of assembly technology

Abstract

The handbook consists of eleven chapters. It discusses fundamental aspects of the assembly of selected assembly units and selected methods of joining components of machinery and equipment. The characteristics of assembly methods depending on the production volume, organization and technological equipment of a production plant are included, i.e. assembly with complete (full) interchangeability, with the use of selection, with the use of compensation and with individual adjustment of assembled elements, while the principles of selection assembly are discussed in detail. The characteristics and principles of creating pivot-friction joints, adhesive joints of metals and their alloys and polymer plastics, riveted, soldered, welded and threaded joints are presented. The principles of assembly of bearings, gears and cylindrical adhesive joints are included. Issues of regeneration of machine elements with the use of regenerative polymer compounds are presented, including a demonstration of an exemplary repair with regenerative polymer compounds and a comparison of the strength of a regenerated and an undamaged component.

Keywords: assembly, methods of assembly, methods of joining elements, friction-pin joints, adhesive joints, riveted joints, soldered joints, welded joints, threaded joints, regeneration, polymer regeneration mass

Przedmowa

Montaż (z jęz. franc. *montage*) oznacza spiętrzenie, utworzenie, zbudowanie. Zagadnienia związane z technologią montażu zawarte są w normie PN/M-08508. Proces technologiczny montażu jest to część procesu produkcyjnego obejmująca całokształt czynności związanych z wykonaniem kolejnych operacji montażowych. Polega na łączeniu oddzielnych elementów w jednostki montażowe wyższego rzędu lub gotowy wyrób według określonych warunków technicznych. Jest to ogół czynności mających na celu łączenie poszczególnych części w podzespoły, zespoły, mechanizmy i gotowy wyrób. Wśród elementów konstrukcyjnych wyróżnia się m.in. korpusy, obudowy, koła, wały oraz inne części złączne, takie jak śruby, podkładki, kliny itp.

Montaż jest końcowym etapem procesu wytwarzania maszyn i urządzeń, podczas którego następuje nadanie określonych cech użytkowych i eksploatacyjnych wyrobów, np. w postaci maszyn, pojazdów, sprzętu gospodarstwa domowego oraz różnego rodzaju zespołów. Dlatego też montaż jest istotnym etapem w procesie produkcji, obejmujący łączenie różnych części i komponentów, aby stworzyć gotowy produkt. Istnieje wiele różnych metod montażu, z których wybiera się tę odpowiednią w zależności od rodzaju produktu, jego złożoności i wymagań technicznych. Wybór odpowiedniej metody montażu zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj produktu, ilość produkowanych jednostek, dostępność technologii i budżet produkcji. Ważne jest również zapewnienie, że proces montażu jest zgodny z normami jakościowymi i bezpieczeństwa.

Maszyna jest to zespół mechanizmów we wspólnym korpusie, służący do wykonania określonej użytecznej pracy. Mechanizm stanowi układ powiązanych i współpracujących ze sobą części maszyn, mogących wykonywać określone ruchy w wyniku pobierania energii mechanicznej. Częścią maszyny nazywa się elementarny jej składnik wykonany z jednej części materiału, czyli bez zastosowania czynności montażowych.

Zasadnicze czynności montażu, którym jest łączenie części, można podzielić ze względu na liczbę ruchów koniecznych do wykonania połączenia oraz stosowanego rodzaju procesu fizykalnego. Połączeniem nazywa się część wyrobu stanowiącą połączenie dwóch lub więcej jednostek montażowych. W skład połączenia wchodzi: jednostki główne, jednostki pomocnicze służące do powiązania ze sobą jednostek głównych, zwane łącznikami (np. nity, śruby), oraz jednostki złączne – zwane złączkami, które zajmują pozycję pośrednią pomiędzy jednostkami głównymi a łącznikami (np. podkładki, nakładki itp.). Jedna z łączonych jednostek głównych stanowi konstrukcję nośną montowanego zespołu i przyjmuje się ją jako jednostkę bazową. Proste wyroby, składające się z kilku czy kilkunastu części, montuje się bezpośrednio. Wyroby bardzo złożone, składające się z wielu części, montuje się etapami: najpierw w podzespoły, później z podzespołów w zespoły i na koniec dopiero jako gotowy wyrób. Metody łączenia oraz sposoby wykonania połączeń są ściśle ze sobą związane. W wyniku kołkowania, skręcania lub zawijania powstają połączenia kołkowe, skręcane lub zawijane.

Natomiast w wyniku lutowania, spawania, klejenia czy nitowania powstają połączenia lutowane, spawane, klejowe czy nitowe.

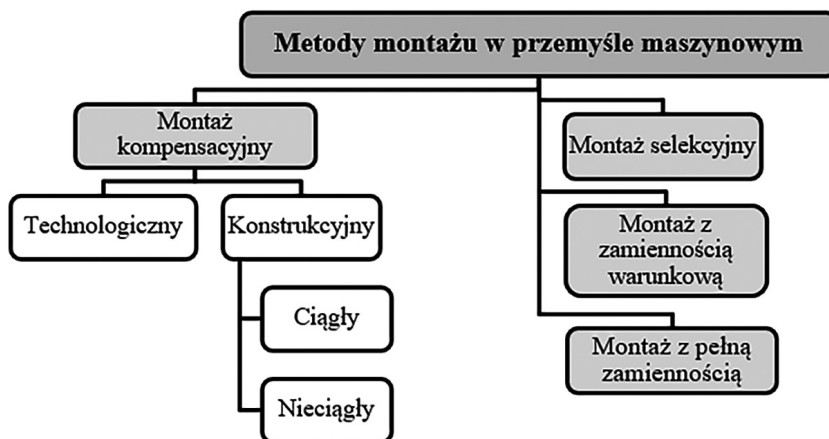
W podręczniku zaprezentowano podstawowe zagadnienia związane z montażem wybranych zespołów montażowych oraz wybrane metody łączenia elementów maszyn i urządzeń. Przedstawiono charakterystykę metod montażu w zależności od wielkości produkcji, organizacji i wyposażenia technologicznego zakładu. Podręcznik zawiera również charakterystykę i zasady wykonywania połączeń czopowo-ciernych, klejowych metali i ich stopów oraz tworzyw polimerowych, połączeń nitowanych, lutowanych, zgrzewanych oraz gwintowych. Zamieszczono zasady montażu łożysk tocznych, przekładni zębatych oraz połączeń klejowych cylindrycznych. Zaprezentowano także zagadnienia regeneracji elementów maszyn za pomocą polimerowych mas regeneracyjnych, w tym opis wykonania przykładowej naprawy za pomocą regeneracyjnych mas polimerowych oraz porównanie wytrzymałości elementu poddanego regeneracji oraz elementu nieuszkodzonego.

Niniejszy podręcznik skierowany jest przede wszystkim do studentów kierunku mechanika i budowa maszyn, zarządzanie i inżynieria produkcji, inżynieria produkcji i innych prowadzonych na wydziałach mechanicznych uczelni technicznych jako pomoc dydaktyczna w zakresie przedmiotu podstawy technologii montażu. Może również stanowić istotną pomoc dla studentów w zakresie przedmiotów związanych z zagadnieniami montażowymi na uczelniach technicznych.

Wprowadzenie

Montaż polega na kojarzeniu, względnie dopasowywaniu, części, ich wzajemnym zorientowaniu, a następnie łączeniu. Montaż prostych i złożonych wyrobów odnosi się do procesu łączenia różnych komponentów i części, aby stworzyć gotowy produkt. Istnieje różnica między montażem prostym a montażem złożonym, zarówno pod względem skomplikowania procesu, jak i samego produktu końcowego. Montaż prostych wyrobów obejmuje łączenie kilku podstawowych komponentów w celu utworzenia produktu. Produkty te mają ograniczoną liczbę części i zazwyczaj są stosunkowo łatwe do zmontowania. Montaż prostych wyrobów może być wykonywany ręcznie przez pracowników lub przy użyciu prostych narzędzi. Montaż złożonych wyrobów jest bardziej skomplikowany i wymaga łączenia wielu części i podsystemów. Proces montażu złożonych wyrobów może być bardziej zautomatyzowany i wymagać bardziej zaawansowanych narzędzi i technologii, takich jak roboty przemysłowe i linie montażowe. Montaż złożonych wyrobów często wymaga precyzyjnej kontroli jakości oraz dokładności, aby zapewnić zgodność produktu z wymaganiami technicznymi i bezpieczeństwa.

Podział metod montażu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Podział metod montażu

W zależności od wielkości produkcji, organizacji i wyposażenia technologicznego zakładu można przyjąć następujący uproszczony podział metod montażu [1]:

- montaż z całkowitą (pełną) zamiennością,
- z zamiennością warunkową,
- z zastosowaniem kompensacji,
- z indywidualnym dopasowaniem składanych elementów,
- z zastosowaniem selekcji.

Montaż z całkowitą zamiennością

Montaż z całkowitą zamiennością polega na składaniu jednostek montażowych z takich elementów, które mogą być dowolne, lecz wykonane według założonych wymiarów i innych wymagań. Jest stosowany wówczas, gdy wszystkie elementy są wykonane w granicach wymaganych tolerancji wymiarów, kształtów, gładkości powierzchni. Elementy te, dowolnie wybrane, nawet przy najniekorzystniejszym rozkładzie odchyłek wymiarowych, zapewniają uzyskanie zespołu w ustalonych granicach tolerancji [3].

Najważniejszymi zaletami montażu z pełną zamiennością są:

- prosty i niedrogi montaż, gdyż części bez szczególnego dobierania, zestawiania lub dopasowywania mogą być użyte do montażu,
- montaż mogą wykonywać robotnicy o niezbyt wysokich kwalifikacjach,
- łatwość normowania czynności montażowych,
- łatwość zmiany na montaż potokowy,
- możliwość dokonania podziału na prace wykonywane w zakładzie i poza nim przez oddzielne zakłady wytwarzające części oraz zespoły i produkty finalne,
- brak problemów z produkcją części zamiennych (zastępujących części zużyte).

Montaż z zamiennością warunkową

Montaż z zamiennością warunkową (tzw. niemiecką) to metoda montażu, która polega na dostosowywaniu procesu montażu w zależności od różnych warunków lub wymagań, takich jak rodzaj produktu, specyfikacja klienta lub dostępność komponentów. Jest to szczególnie przydatne w produkcji na zamówienie, gdzie każdy produkt może mieć unikalne cechy lub elementy [5].

Głównymi cechami montażu z zamiennością warunkową są:

- dostosowywanie procesu: w montażu z zamiennością warunkową proces montażu może być dostosowywany do konkretnej specyfikacji produktu lub zamówienia. Może to obejmować różne kombinacje komponentów, konfiguracje czy nawet zmienne procesy montażu,
- zautomatyzowane systemy: często montaż z zamiennością warunkową jest wspomagany przez zaawansowane systemy automatyzacji i technologie przemysłowe. Te systemy mogą pomóc w określaniu i implementowaniu odpowiednich operacji montażowych w zależności od parametrów wejściowych,
- skanowanie i identyfikacja: w celu dostosowania procesu montażu, skanery lub inne technologie identyfikacyjne mogą być używane do rozpoznawania komponentów, kodów kreskowych, tagów RFID lub innych oznaczeń, które informują system o wymaganiach montażowych,
- oprogramowanie kontrolne: systemy montażu z zamiennością warunkową często korzystają z zaawansowanego oprogramowania kontrolnego, które pozwala na zarządzanie i monitorowanie procesu montażu, a także na szybkie reagowanie na zmiany i dostosowywanie się do nich,

- dokumentacja i śledzenie: w celu zapewnienia jakości i ścisłej kontroli nad procesem montaż z zamiennością warunkową może obejmować szczegółową dokumentację i śledzenie każdego produktu od momentu przyjęcia zamówienia do momentu wysyłki,
- Montaż z zamiennością warunkową jest szczególnie przydatny w przypadku produkcji o niskim wolumenie, gdzie każdy produkt jest unikalny, oraz w sytuacjach, gdzie klient wymaga spersonalizowanych produktów. Pozwala to na elastyczność w dostosowywaniu produkcji do zmieniających się warunków i potrzeb rynkowych, co może zwiększyć efektywność produkcji i zadowolenie klienta.

Montaż z zamiennością warunkową ma wiele zalet, które sprawiają, że jest to efektywna metoda w wielu rodzajach produkcji, zwłaszcza tam, gdzie produkty są niestandardowe lub mają różne warianty. Do głównych zalet montażu z zamiennością warunkową można zaliczyć:

- dostosowanie do indywidualnych potrzeb klienta,
- zwiększenie elastyczności poprzez dostosowanie procesu montażu w zależności od dostępności komponentów, zmiany specyfikacji lub innych czynników,
- zminimalizowanie odpadów za sprawą braku konieczności przechowywania dużej ilości gotowych produktów lub komponentów, wskutek czego produkcja jest bardziej efektywna i ekologiczna,
- optymalizacja kosztów,
- poprawa jakości poprzez kontrolę i dostosowanie metody montażu do konkretnej specyfikacji produktu,
- skrócenie czasu dostawy,
- zminimalizowanie ryzyka nadprodukcji, ponieważ montaż z zamiennością warunkową pomaga uniknąć nadprodukcji, co może prowadzić do nadmiernych kosztów i obniżenia marży.

Należy jednak pamiętać, że montaż z zamiennością warunkową wymaga zaawansowanych systemów zarządzania produkcją, technologii identyfikacyjnych i oprogramowania kontrolnego.

Montaż z zastosowaniem metody kompensacji

Montaż metodą kompensacji opiera się na założeniu, że żadaną dokładność ogniwa zamykającego osiąga się przez zmianę wielkości jednego z ogniw składowych.

Można to osiągnąć następującymi sposobami [4]:

- przez wprowadzanie do łańcucha wymiarowego dodatkowej części (tzw. kompensatora), wykonanej według różnych wymiarów różniących się między sobą o wartość tolerancji ogniwa zamykającego – wielkość kompensatora dobierana jest w trakcie montażu,
- przez wprowadzenie do łańcucha wymiarowego kilku dodatkowych części (kompensatorów),

- przez zmianę położenia jednego z elementów zespołu zmontowanego,
- przez zmianę wymiarów jednej z części, która w tym celu ma pozostawiony naddatek na obróbkę. Wymiar tej części w ogólnym łańcuchu wymiarowym jest ogniwem kompensacyjnym (tzw. kompensacja technologiczna).

Zaletą metody montażu z kompensacją, zwłaszcza przy użyciu kompensatorów ruchowych, jest to, że pozwala ona na największe rozszerzenie tolerancji wykonania elementów łączonych. Kolejną zaletą tej metody jest możliwość osiągnięcia dowolnego stopnia dokładności przy montażu i utrzymaniu tej dokładności w czasie eksploatacji przez wymianę zużytych kompensatorów lub ciągłą regulację powstających luzów [4].

Metoda montażu kompensacyjna z indywidualnym dopasowaniem

Metoda montażu z dopasowywaniem składowych elementów polega na tym, że wymaganą dokładność wymiaru wynikowego uzyskuje się przez zmianę wymiaru jednego, z góry określonego ogniwa łańcucha wymiarowego za pomocą szlifowania, toczenia, piłowania, skrobania itp. Przy stosowaniu takiego montażu należy na ogniwie kompensującym przewidzieć odpowiedni naddatek umożliwiający, nawet przy najmniej korzystnym rozkładzie odchyłek wymiarowych, przeprowadzenie odpowiedniej obróbki. Jest to tzw. kompensacja technologiczna. Do wad montażu z indywidualnym dopasowaniem, stosowanym w produkcji małoseryjnej i jednostkowej, należy zaliczyć jego dużą pracochłonność oraz konieczność zatrudnienia pracowników o wysokich kwalifikacjach [1].

Selekcyjna metoda montażu

Metoda montażu selekcyjna (z grupowym doбором jednostek montażowych), zwana również montażem selekcyjnym lub metodą selekcyjną, jest jedną z metod stosowanych w produkcji o niepełnej zamienności części. Metodę tę stosuje się zwłaszcza w tych przypadkach, gdy ze względów konstrukcyjnych nie ma możliwości rozszerzenia tolerancji ogniwa zamykającego, a zawężenie poszczególnych ogniw łańcucha jest niemożliwe bądź nieopłacalne [5].

Metoda selekcyjna polega na tym, że przed rozpoczęciem właściwego montażu cała partia części maszyn lub innych jednostek montażowych zostaje zmierzona, a następnie podzielona na grupy w ten sposób, że w każdej z nich są jednostki, których wymiary graniczne zawierają część pola tolerancji wykonania. Dzięki selekcji istnieje możliwość uzyskania węższej tolerancji ogniwa zamykającego przy stosunkowo szerokich tolerancjach pozostałych ogniw łańcucha wymiarowego.

Bibliografia

1. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. WN PWN, Warszawa 1995.
2. Kujan A.: *Komputerowa analiza ilości grup w montażu selekcyjnym – opracowanie programu wspomagającego dobór par*. Praca magisterska pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. J. Kuczmaszewskiego. Lublin 2000.
3. Puff T., Sołtys W.: *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1980.
4. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
5. Richter E.: *Montaż w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1980.

1. Montaż selekcyjny

Montaż selekcyjny w praktycznym znaczeniu polega na precyzyjnym umieszczeniu określonych komponentów lub elementów w określonych miejscach montowanej konstrukcji. Jest to szczególnie przydatne w procesach, gdzie wymagana jest dokładność i kontrola procesu montażu. Montaż selekcyjny jest szeroko stosowany w produkcji elektroniki, optyki, medycyny, a także w innych dziedzinach, gdzie precyzja i dokładność są kluczowe. Przykładowe zastosowania obejmują montaż układów scalonych na płytkach drukowanych, umieszczanie soczewek w urządzeniach optycznych, montaż mikroskładników medycznych itp.

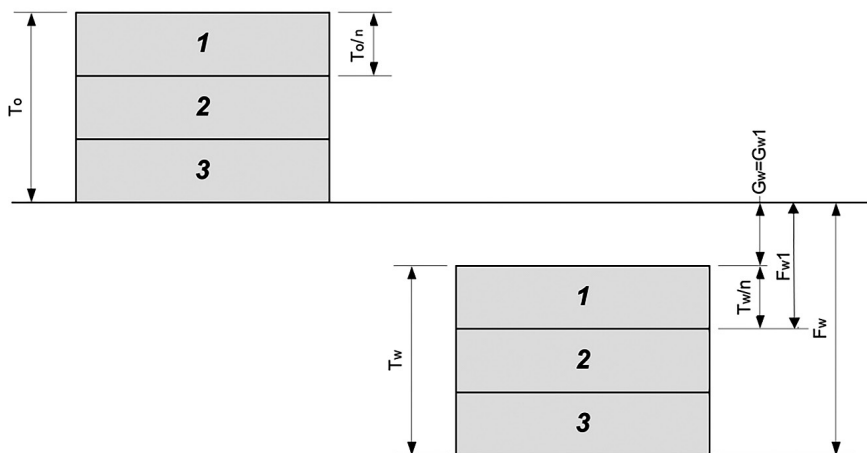
Proces montażu selekcyjnego jest często zautomatyzowany przy użyciu specjalistycznych maszyn i robotów. Automatyzacja zwiększa wydajność i dokładność, a także eliminuje ryzyko błędów ludzkich. W montażu selekcyjnym często stosuje się kamery wizyjne i czujniki do monitorowania procesu, dokładności kształtowo-wymiarowej i kontroli jakości. Kamery wizyjne są używane do identyfikacji komponentów oraz do precyzyjnego pozycjonowania ich w montowanej konstrukcji.

Montaż selekcyjny może być stosowany zarówno w przypadku prostych, jak i złożonych elementów. Pozwala na dostosowywanie procesu montażu do wymagań każdego produktu i jest kluczową techniką w produkcji wielu zaawansowanych i precyzyjnych produktów. Dzięki temu można osiągnąć wysoką jakość, kontrolować koszty produkcji i zwiększyć konkurencyjność na rynku.

1.1. Istota montażu selekcyjnego

Istotą procesu montażu selekcyjnego jest uzyskanie małej tolerancji pasowania montowanych elementów nie w wyniku bardzo dokładnej obróbki ich współpracujących powierzchni, ale przez dobór ich w pary spełniające warunek małej tolerancji pasowania T_p . Tolerancję konstrukcyjną pasowania określa zależność (1.1):

$$T_p = T_o + T_w \quad (1.1)$$



Rys. 1.1. Schemat położenia pól tolerancji i odchyłek granicznych dla trzech grup selekcyjnych,

gdzie:

- 1, 2, 3... – numer grupy selekcyjnej,
- T_o – tolerancja wykonania otworu,
- T_w – tolerancja wykonania wałka,
- $T_{o/n}$ – tolerancja n-tej grupy selekcyjnej otworu,
- $T_{w/n}$ – tolerancja n-tej grupy selekcyjnej wałka,
- $G_w = G_{w1}$ – górna odchyłka 1 grupy selekcyjnej wałka,
- F_{w1} – dolna odchyłka 1 grupy selekcyjnej wałka,
- F_w – dolna odchyłka wałka.

Aby uzyskać małą tolerancję pasowania w montażu, należy części zmierzyć i podzielić tolerancje konstrukcyjne na n grup (rys. 1.1). Wówczas tolerancję pasowania grupy selekcyjnej T_{pn} wyraża poniższy wzór (1.2):

$$T_{pn} = \frac{T_p}{n} = \frac{T_o + T_w}{n} = \frac{T_o}{n} + \frac{T_w}{n} \quad (1.2)$$

Stąd wynika, że tolerancja w grupie selekcyjnej wałków i otworów będzie odpowiednio równa:

$$T_{on} = \frac{T_o}{n}; \quad T_{wn} = \frac{T_w}{n}; \quad \text{ogólnie } T_n = \frac{T}{n} \quad (1.3)$$

Ważna jest, z punktu widzenia działania zmontowanego w danej grupie selekcyjnej zespołu otwór-wałek, znajomość luzów granicznych tego zespołu. Do obliczenia luzów niezbędna jest znajomość wartości odchyłek granicznych. W tym przypadku należy wyznaczyć odchyłki graniczne dla grup selekcyjnych, korzystając ze wzoru:

$$T = G - F \quad (1.4)$$

Z wzoru tego wynika, że:

$$T_n = \frac{T}{n} = \frac{G}{n} - \frac{F}{n} = G_n - F_n \quad (1.5)$$

Stąd:

$$G_n = \frac{G}{n}; F_n = \frac{F}{n} \quad (1.6)$$

Odchyłki graniczne w n-tej grupie selekcyjnej można wyznaczyć z poniższych zależności:

Dla pierwszej grupy selekcyjnej:

$$G_1 = G; F_1 = G - \frac{T}{n} = G - \frac{G-F}{n} \quad (1.7)$$

Dla drugiej grupy selekcyjnej:

$$G_2 = F_1 = G - \frac{G-F}{n} \quad (1.8)$$

$$F_2 = G - \frac{G-F}{n} - \frac{G-F}{n} = G - \frac{2(G-F)}{n} \quad (1.9)$$

Dla trzeciej grupy selekcyjnej:

$$G_3 = F_2 = G - \frac{2(G-F)}{n} \quad (1.10)$$

$$F_3 = G - \frac{2(G-F)}{n} - \frac{G-F}{n} = G - \frac{3(G-F)}{n} \quad (1.11)$$

W grupie selekcyjnej wałka lub otworu wartości odchyłek będą więc równe:

$$G_k = G - \frac{(k-1) \times (G-F)}{n} \quad (1.12)$$

a po uwzględnieniu wzoru (1.4) wartość tych odchyłek wyniesie:

$$G_k = G - \frac{(k-1) \times T}{n} \quad (1.13)$$

$$F_k = G - \frac{k \times T}{n}$$

gdzie:

k = 1 do n – numer grupy selekcyjnej.

1.1.1. Wyznaczanie luzów dla grup selekcyjnych

Luzy graniczne określają ogólnie zależności:

$$L_{\max k} = B_o - A_w = G_o - F_w \quad (1.14)$$

$$L_{\min k} = A_o - B_w = F_o - G_w \quad (1.15)$$

gdzie:

- B_o – górny wymiar graniczny otworu,
- A_w – dolny wymiar graniczny wałka,
- A_o – dolny wymiar graniczny otworu,
- B_w – górny wymiar graniczny wałka,
- $L_{\max k}$ – maksymalny luz dla k-tej grupy selekcyjnej,
- $L_{\min k}$ – minimalny luz dla k-tej grupy selekcyjnej.

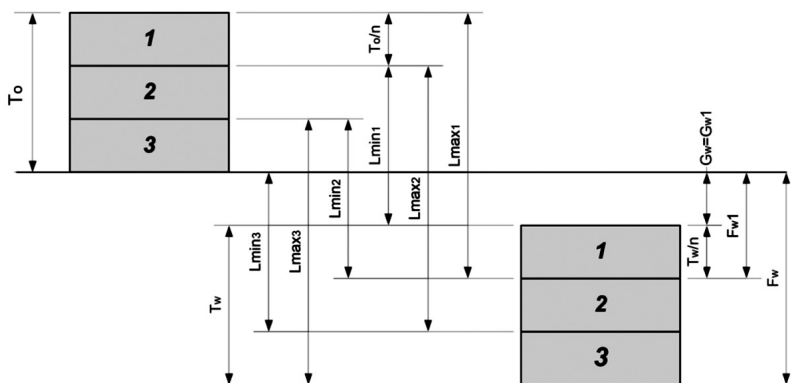
Luzy graniczne w grupie selekcyjnej można wyznaczyć, jeżeli do wzorów (1.14), (1.15) zostaną podstawione wartości odchyłek dla grup selekcyjnych otworów i wałków określonych wzorami (1.16), (1.17):

$$L_{\max k} = G_o - \frac{(k-1) \times T_o}{n} - G_w + \frac{k \times T_w}{n} \quad (1.16)$$

$$L_{\min k} = F_{ko} - G_{kw} = \left[G_o - \frac{k \times T_o}{n} \right] - \left[G_w - \frac{(k-1) \times T_w}{n} \right] \quad (1.17)$$

$$L_{\min k} = G_o - \frac{k \times T_o}{n} - G_w + \frac{(k-1) \times T_w}{n}$$

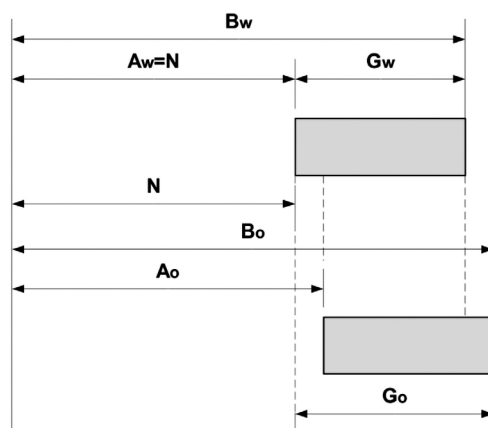
Uzyskuje się w ten sposób zależności (1.16) oraz (1.17) umożliwiające wyznaczenie wartości luzów maksymalnych i minimalnych w grupie selekcyjnej (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Wartości graniczne luzów dla trzech grup selekcyjnych

1.1.2. Wymiary graniczne otworów i wałków przeznaczonych do montażu selekcyjnego

Do przeprowadzenia selekcji oprócz wyników pomiarów otworów i wałków niezbędne jest określenie luzów granicznych w grupie selekcyjnej. Luzy graniczne w grupie selekcyjnej (konstrukcyjnej) przyjmuje się w wyniku analizy konstrukcyjnej zespołu otwór-wałek i wymaganych warunków współpracy tego zespołu [6]. Znajac tolerancję konstrukcyjną (T_o , T_w), luzy graniczne w grupie selekcyjnej określają wzory (1.14) i (1.15). Do wyznaczenia tych luzów niezbędna jest znajomość również odchyłek G_o i G_w . Odchyłki można wyznaczyć, posługując się wymiarami granicznymi, tak jak przedstawiono na rysunku 1.3.



Rys. 1.3. Graficzne przedstawienie przesunięcia położenia pól tolerancji otworu względem wałka

Przy przyjęciu tolerancji konstrukcyjnej otworów i wałków wartość jej można wyznaczyć jako różnicę odpowiednich wymiarów granicznych z poniższych wzorów (1.18) oraz (1.19):

$$T_o = B_o - A_o \quad (1.18)$$

$$T_w = B_w - A_w \quad (1.19)$$

W rzeczywistości tolerancja konstrukcyjna jest parametrem czysto teoretycznym, czasami znacznie odbiegającym od rzeczywistości. W praktyce rozrzut wymiarów wykonywanych średnic otworów i wałków zależy od stabilności i dokładności technologicznej procesu. W takich warunkach lepsze rezultaty montażu selekcyjnego można uzyskać, wyznaczając rzeczywistą tolerancję technologiczną. Tolerancję tę można wyznaczyć w następujący sposób:

- dokonać pomiaru serii o liczebności n otworów i tyle samo wałków,
- na podstawie uzyskanych rzeczywistych wyników pomiarów wyznaczyć średnią wartość średnicy otworów \bar{d}_o i wałków \bar{d}_w , korzystając z zależności (1.20):

$$\bar{d}_{(o,w)} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1.20)$$

- dysponując wartością średnią średnicy wałka i otworu, można wyznaczyć rzeczywiste wartości wymiarów granicznych, korzystając z wzorów (1.21) oraz (1.22):

$$\bar{d}_{(o,w)} = \frac{B_{(o,w)} + A_{(o,w)}}{2} \quad (1.21)$$

$$T_{r(o,w)} = B_{(o,w)} - A_{(o,w)} \quad (1.22)$$

- przy czym niezbędna jest do tego znajomość rzeczywistej wartości tolerancji technologicznej,
- wyznaczyć oszacowanie odchylenia standardowego $S_{d(o,w)}$ wartości średnicy wałka i otworu:

$$S_{d(o,w)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{i(o,w)} - \bar{d}_{(o,w)})^2}{n-1}} \quad (1.23)$$

- wyznaczyć wartość rzeczywistej tolerancji technologicznej $T_{r(o,w)}$ tych części, korzystając z zależności:

$$T_{r(o,w)} = k_{\alpha,f} \times S_{d(o,w)} \quad (1.24)$$

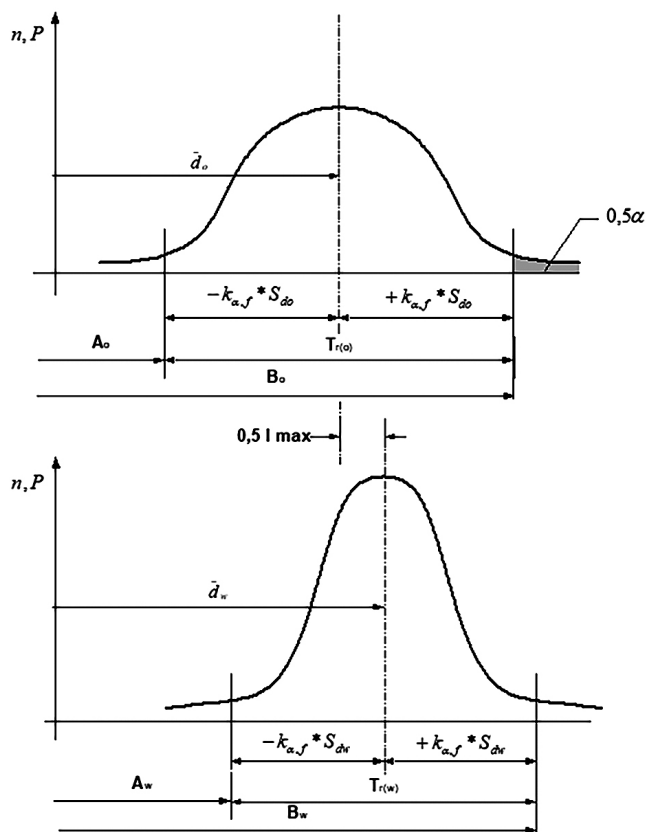
Wartość $k_{\alpha,f}$ należy przyjąć na podstawie tablic statystycznych rozkładu t-Studenta lub rozkładu normalnego Gaussa, zakładając prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju 2–5%.

- wyznaczyć rzeczywiste wartości graniczne $A_{(o,w)}$ oraz $B_{(o,w)}$, korzystając z zależności:

$$A_{(o,w)} = \bar{d}_{(o,w)} - 0,5T_{r(o,w)} \quad (1.25)$$

$$B_{(o,w)} = \bar{d}_{(o,w)} + 0,5T_{r(o,w)} \quad (1.26)$$

Graficzną interpretację powyższych rozważań przedstawiono na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. Graficzne przedstawienie przesunięcia położenia pól tolerancji rzeczywistej otworu względem wałka dla procesu o różnym odchyleniu standardowym wałka i otworu

1.2. Zalety i wady montażu selekcyjnego

Montaż selekcyjny odznacza się wieloma zaletami. Do głównych zalet można zaliczyć:

- precyzję i dokładność – montaż selekcyjny pozwala na osiągnięcie bardzo wysokiej precyzji w umieszczaniu komponentów lub elementów w konstrukcji,
- elastyczność – montaż selekcyjny może być dostosowany do różnych rodzajów komponentów i produktów za pomocą odpowiedniego oprogramowania,
- możliwość automatyzacji – automatyzacja procesu montażu selekcyjnego pozwala na zwiększenie wydajności produkcji i eliminację ryzyka błędów ludzkich, maszyn i roboty wykonują operacje montażowe z dużą dokładnością,

- minimalizację odpadów – montaż selekcyjny pomaga w redukcji odpadów, ponieważ umożliwia dokładne pozycjonowanie komponentów, co zmniejsza ilość wadliwie zmontowanych konstrukcji,
- minimalizację ryzyka błędów – proces montażu selekcyjnego pomaga minimalizować ryzyko błędów ludzkich,
- możliwość dostosowania do różnych rodzajów komponentów – montaż selekcyjny może być stosowany zarówno do małych, precyzyjnych komponentów, jak i większych elementów,
- możliwość kontroli jakości w czasie rzeczywistym – zaawansowane kamery wizyjne i czujniki umożliwiają monitorowanie procesu montażu oraz kontrolę jakości w czasie rzeczywistym,
- replikowalność – montaż selekcyjny gwarantuje spójność produkcji, ponieważ każdy produkt jest montowany zgodnie z precyzyjnymi parametrami i specyfikacją,
- możliwość implementacji w procesach montażu niestandardowych produktów – montaż selekcyjny pozwala na produkcję niestandardowych produktów, gdzie dokładność wymiarową można dostosować do indywidualnych potrzeb klienta,
- kontrolę tolerancji – w przypadku produktów o małych tolerancjach wymiarowych montaż selekcyjny pozwala na kontrolowanie tych tolerancji i dostosowywanie procesu, aby spełnić ściśle określone wymagania.

Jak w każdej metodzie, także w montażu selekcyjnym występują pewne wady i ograniczenia. Wśród nich wyróżnić można:

- wysoki koszt – wdrożenie montażu selekcyjnego może wiązać się z dużymi kosztami inwestycji w specjalistyczny sprzęt, oprogramowanie i szkolenie personelu,
- złożoność programowania – programowanie maszyn do przeprowadzania precyzyjnego montażu może być skomplikowane i wymagać specjalistycznej wiedzy,
- konieczność utrzymania i serwisu – specjalistyczne maszyny i urządzenia używane w montażu selekcyjnym wymagają regularnego utrzymania i serwisowania,
- złożoność związana z rodzajem komponentów – montaż selekcyjny może być bardziej skomplikowany i kosztowny w przypadku bardzo małych lub nietypowych komponentów,
- niewielka elastyczność w produkcji masowej – montaż selekcyjny może być mniej efektywny w produkcji masowej, gdzie konieczne jest montowanie dużej ilości identycznych produktów w krótkim czasie,
- wysokie wymagania kadrowe – obsługa i utrzymanie maszyn montażowych wymagają specjalistycznego personelu, co może zwiększyć koszty zatrudnienia.

1.3. Wykonanie ćwiczenia

1.3.1. Cel ćwiczenia

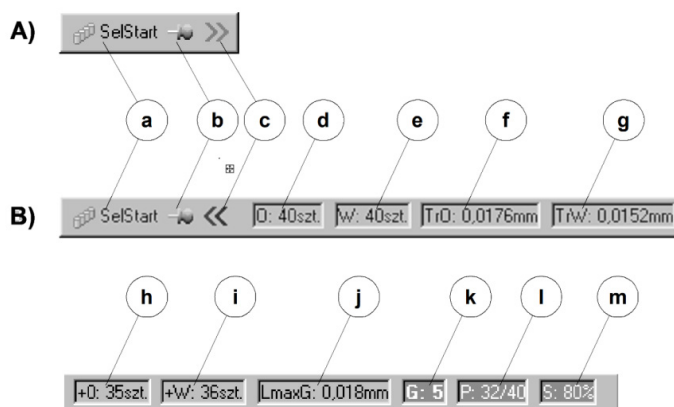
Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodą podziału tolerancji na grupy selekcyjne w taki sposób, by przy niesymetrycznych krzywych rozrzutu wymiarów wałków i otworów uzyskać równe liczby sztuk części w odpowiadających sobie grupach selekcyjnych.

1.3.2. Program realizacji ćwiczenia

- Przeprowadzić pomiary średnic otworu i wałka dla przekazanej partii elementów lub wygenerować wyniki pomiarów w programie – postępować zgodnie z zaleceniami prowadzącego ćwiczenia.
- Uzyskane wyniki poddać obróbce za pomocą programu komputerowego zgodnie z poniżej przedstawioną instrukcją.
- Sformułować wnioski dotyczące uzyskanych wyników zamieszczonych w raporcie.

1.3.3. Opis obsługi i menu programu *Montaż Selekcyjny*¹

Uruchomienie programu *Montaż Selekcyjny* w systemie Microsoft Windows polega na wybraniu z menu Start/Programy/Montaż Selekcyjny ikony programu. W czasie uruchamiania zostanie wyświetlony tzw. *splash screen*, czyli okno powitalne informujące użytkownika o uruchamianym programie. Gdy program zostanie uruchomiony, na górze ekranu pojawi się pasek stanu (rys. 1.5) będący centrum obsługi i informacji programu.



Rys. 1.5. Pasek stanu: A) zminimalizowany, B) pełna postać

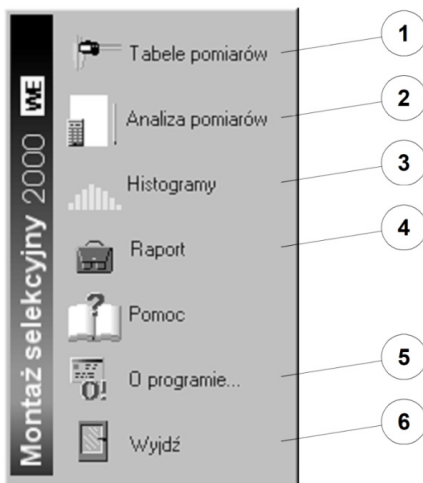
¹ Podrozdział został opracowany na podstawie pracy [2].

Standardowo pasek stanu jest wyświetlany w pełnej formie (rys. 1.5. B), lecz w zależności od preferencji użytkownika może być w każdej chwili zminimalizowany do postaci A (rys. 1.5. A). W tym przypadku znajdują się na nim jedynie najistotniejsze elementy, takie jak:

- przycisk **SelStart** (a) rozwijający menu modułów programu jak na rysunku 1.6,
- przycisk **Zawsze na wierzchu** (b), wciśnięcie którego umożliwi zasłonięcie paska stanu przez inne okno czy program,
- przycisk **Zwiń/Rozwiń** (c) zmieniający formę wyświetlania paska stanu.

Po rozwinięciu paska stanu do pełnej postaci B oprócz elementów opisanych powyżej znajdują się na nim dodatkowo okna informujące o parametrach i wynikach aktualnie przeprowadzanej selekcji:

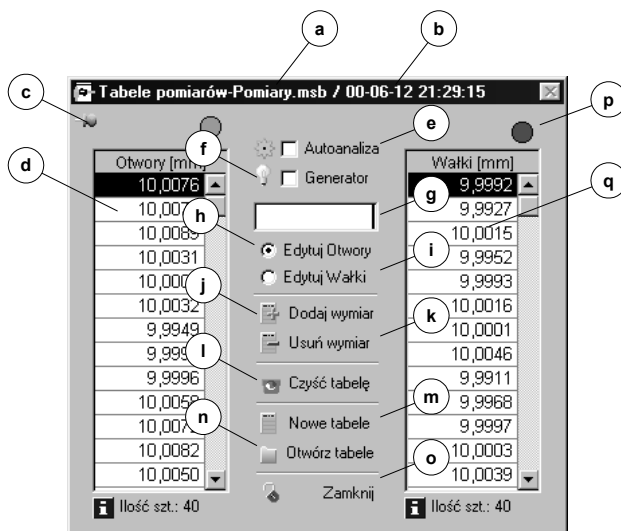
- liczba pomierzonych *otworów* (d),
- liczba pomierzonych *walków* (e),
- wyliczona tolerancja rzeczywista *otworów* (f),
- wyliczona tolerancja rzeczywista *walków* (g),
- liczba *otworów* znajdujących się w polu tolerancji (h),
- liczba *walków* znajdujących się w polu tolerancji (i),
- luz maksymalny grupy selekcyjnej (j),
- liczba grup selekcyjnych (k),
- liczba możliwych par w stosunku do teoretycznej liczby par (l),
- procent selekcji (m).



Rys. 1.6. Menu programu: Montaż Selekcyjny

W momencie, gdy program nie zawiera żadnych danych (wyników pomiarów), np.: zaraz po jego uruchomieniu, okna informacyjne pokazują „0”. Dopiero po wczy-

taniu istniejącego już pliku danych lub utworzeniu nowego pliku i przeprowadzeniu analizy w okienkach zostaną wyświetlone odpowiednie wartości, które będą aktualizowane na bieżąco zgodnie z działaniami użytkownika programu. W przypadku wczytania pliku utworzonego wcześniej analiza i aktualizacja okien informacyjnych nastąpi automatycznie.

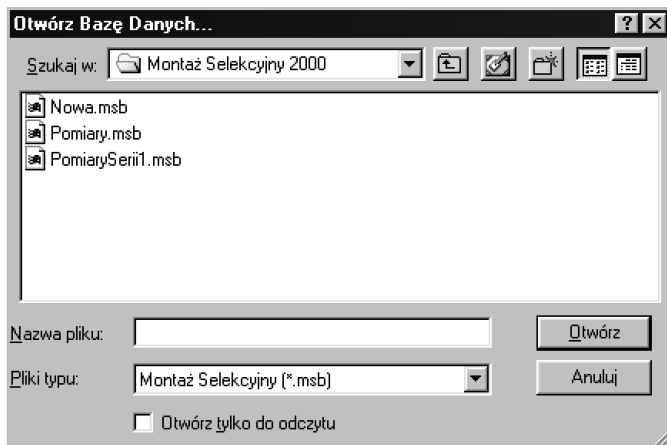


Rys. 1.7. Okno „Tabele pomiarów”

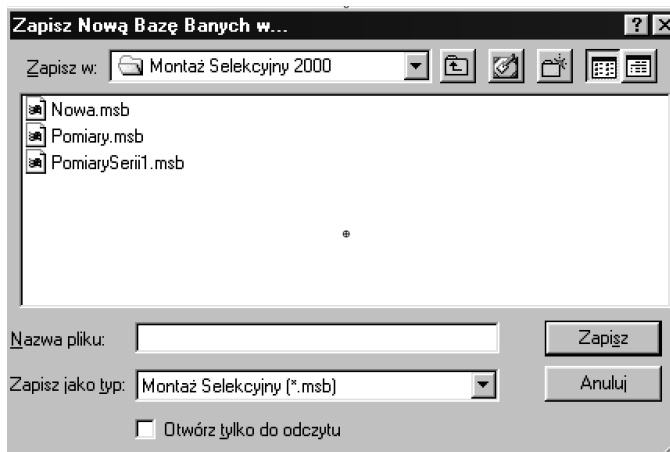
Okno *Tabele pomiarów* (rys. 1.7) służy do wprowadzania i zarządzania wynikami pomiarów *otworów* i *wałków* za pomocą odpowiednich przycisków i kontrolki. W momencie utworzenia okna (z menu programu) nie zawiera ono żadnego aktywnego pliku tabel, nie jest więc jeszcze możliwa jakakolwiek praca z programem. Większość przycisków i kontrolki okna jest w tym stanie nieaktywna z wyjątkiem tych umożliwiających rozpoczęcie pracy. Można tego dokonać na dwa sposoby:

- Wczytując istniejący już plik danych w celu ponownego zapoznania się z wynikami pracy programu lub dokonania zmian i powtórnego przeprowadzenia selekcji. Po kliknięciu przycisku *Otwórz tabele* (n), pojawi się okno wczytywania plików programu zatytułowane *Otwórz Bazę Danych* (rys. 1.8), gdyż pliki tabel w rzeczywistości są bazami danych. Domyślnym katalogiem zawierającym pliki tabel jest katalog programu, a rozszerzeniem pliku *.msb* (montaż selekcyjny baza danych). Jedynie pliki z tym rozszerzeniem będą wyświetlane i możliwe do otwarcia.
- Tworząc nowy plik tabel *.msb*, naciskając na przycisk *Nowe tabele* (m). Analogicznie jak przy otwieraniu plików zostanie wyświetlone okno *Zapisz nową bazę da-*

nych w..., gdzie po podaniu nazwy i wciśnięciu przycisku **Zapisz** zostanie utworzony nowy plik tabel gotowy do pracy (rys. 1.9). Możliwe jest utworzenie pliku tylko z rozszerzeniem **.msb**.



Rys. 1.8. Okno wczytywania plików

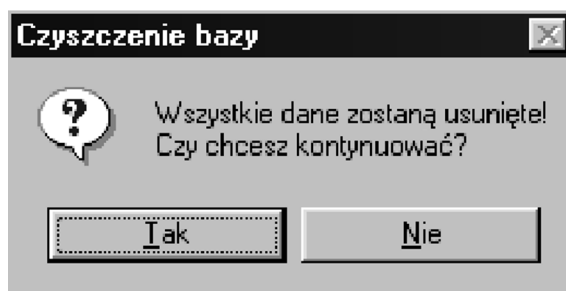


Rys. 1.9. Okno tworzenia nowego pliku tabel

Po utworzeniu nowego pliku wszystkie przyciski i kontrolki okna *Tabele pomiarów* zostaną uaktywnione, a w nagłówku okna zostanie wyświetlona nazwa pliku roboczego (a) oraz data i czas jego utworzenia (b). Oznacza to, że program jest gotowy do pracy, czyli możliwe jest wprowadzenie danych i przeprowadzenie analizy.

Wprowadzenie rzeczywistych wartości pomiarów *otworów* i *walków* do tabel programu wygląda następująco:

- Za pomocą przełączników (h) lub (i) należy wybrać tabelę, do której zostaną wprowadzone pomiary. Zielona kontrolka sygnalizacyjna znajdująca się nad tabelą wskazuje aktywną tabelę, natomiast kontrolka czerwona tabelę nieaktywną.
- Wyniki pomiarów należy wprowadzać pojedynczo do okna tekstowego (g), naciskając za każdym razem za pomocą myszki przycisk **Dodaj wymiar** (j) lub z klawiatury klawisz **Enter**. Kolejność wprowadzania wymiarów w obrębie jednej tabeli jest bez znaczenia. Istotne jest jedynie, aby wyniki pomiarów zarówno *otworów*, jak i *walków* znalazły się w odpowiednich tabelach.
- Dodatkowymi funkcjami edycyjnymi programu są przyciski **Usuń wymiar** (j) oraz **Czyść tabelę** (l). Pierwszy z nich umożliwia usunięcie pojedynczego wyniku pomiaru zaznaczonego myszką w aktywnej tabeli, natomiast użycie drugiego spowoduje usunięcie wszystkich wyników pomiarów z aktywnej tabeli (rys. 1.10). Operacja ta zostanie jednak wykonana za potwierdzeniem użytkownika, gdyż nieuważne jej użycie mogłoby spowodować zniszczenie wyników dotychczasowej pracy.



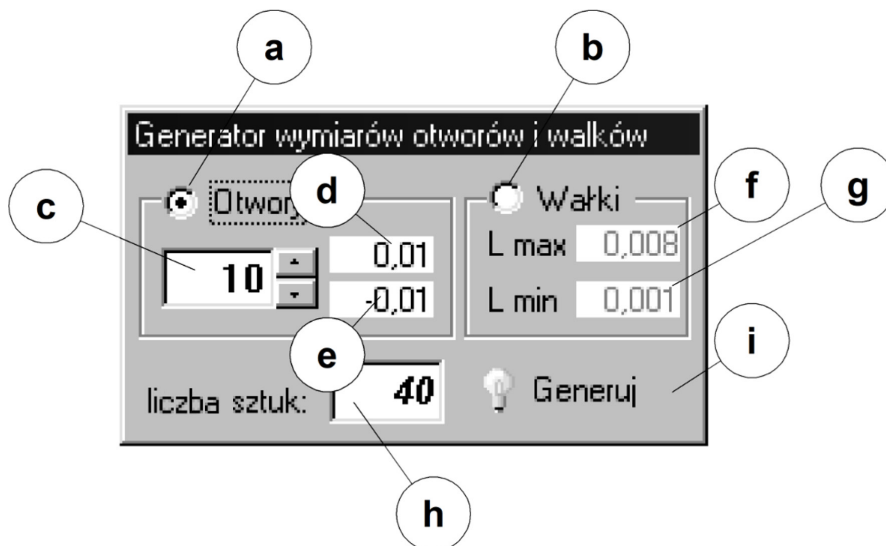
Rys. 1.10. Potwierdzenie usunięcia pomiarów z aktywnej tabeli

Do przeprowadzenia poprawnej i wiarygodnej selekcji niezbędne jest wprowadzenie kilkudziesięciu wyników pomiarów zarówno *otworów*, jak i *walków*. Nie zawsze jest jednak możliwe wykonanie takiej liczby próbek (szczególnie w przypadku ograniczonego czasu trwania zajęć laboratoryjnych), dlatego też program ma możliwość wygenerowania odpowiedniej ich liczby zgodnie z założeniami i wymaganiami użytkownika. Rozwiązanie takie ma jednak jedną wadę związaną z budową nowoczesnych układów mikroprocesorowych, a dotyczącą użytego do tego celu generatora liczb losowych mikroprocesora.

W rzeczywistości w procesie produkcyjnym można spodziewać się rozkładu normalnego, w którym jedne wartości są dużo bardziej prawdopodobne niż inne. W przypadku generatora liczb losowych mikroprocesora występuje rozkład prostokątny, w którym prawdopodobieństwo otrzymania każdej z wartości jest takie samo.

Pomimo znacznego wyeliminowania tej niedogodności może się zdarzyć, że otrzymane rozkłady nie zawsze będą zgodne z oczekiwaniami, do celów poglądowych i dydaktycznych generowane wyniki pomiarów będą jednak w zupełności wystarczające.

Do generowania wymiarów *otworów* i *walków* służy wewnętrzny moduł *Tabeli pomiarów* dostępny po naciśnięciu przycisku **Generator** (f) (rys. 1.11).



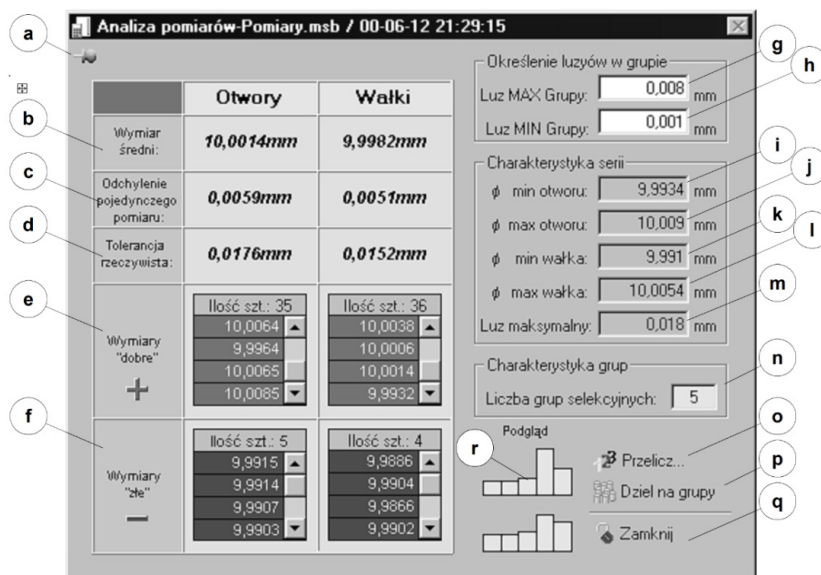
Rys. 1.11. Generator wymiarów otworów i wałków

Generator umożliwia wygenerowanie wymiarów *otworów* (a) i *walków* (b). W przypadku otworów w polu tekstowym (c) należy określić średnicę nominalną w [mm] oraz teoretyczną dokładność wykonania otworu, podając odchyłki górną (d) oraz dolną (e), liczbę sztuk (h), a następnie nacisnąć przycisk **Generuj** (i). Do tabeli otworów zostanie wprowadzona zadeklarowana liczba wyników pomiarów o wartościach od *Nominal* – *Odchyłka dolna* do *Nominal* + *Odchyłka górna*.

Aby mogła zaistnieć poprawna współpraca, części zespołu otwór–wałek projektuje się (rysunek konstrukcyjny) i wykonuje w zależności od charakteru pracy w określonym pasowaniu. Tylko pod tym warunkiem możliwe jest późniejsze właściwe spasowanie tych elementów. Wyniki generowane przez generator nie są rzeczywiste, tzn. nie pochodzą z wykonanych do konkretnego pasowania części i aby umożliwić ich dalszą selekcję, należy zasymulować ich wykonanie (tu w przypadku wałków) z przesuniętym odpowiednio polem tolerancji. W tym celu po wybraniu opcji generowania wałków (b) należy określić żądane luzy maksymalne (f) i minimalne (g), jakie powinny powstać między elementami otwór–wałek po selekcji.

Analogicznie jak w przypadku otworów naciśnięcie przycisku **Generuj** (i) zapełni tabelę wymiarów wałków. Istotne jest, aby liczby sztuk wymiarów otworów i wałków w poszczególnych tabelach były jednakowe. Umożliwia to poprawne określenie liczby możliwych par do otrzymania po analizie pomiarów, do przeprowadzenia której wprowadzanie danych zostało zakończone. Naciśnięcie przycisku **Zamknij** (o) zakończy pierwszy etap pracy z programem.

Dostęp do okna analizy pomiarów (rys. 1.12) odbywa się poprzez wybranie z rozwijanego menu programu **Montaż Selekcyjny** pozycji **Analiza pomiarów**.



Rys. 1.12. Okno *Analiza pomiarów*

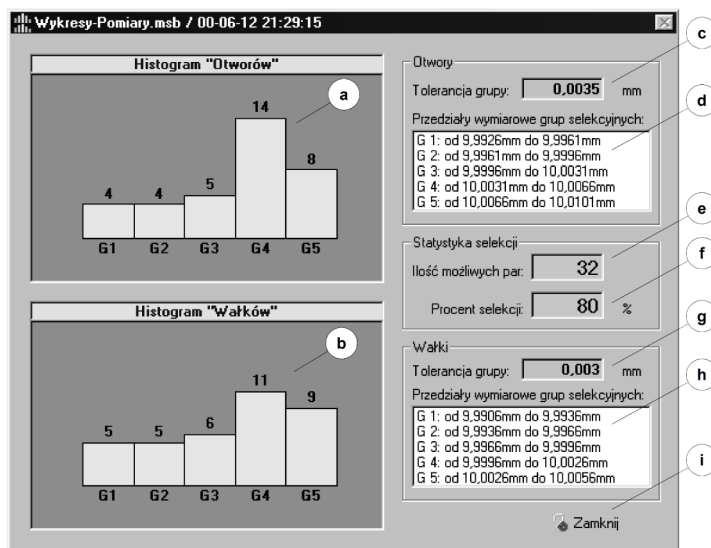
Pracę z oknem *Analiza pomiarów* należy rozpocząć od zdefiniowania wartości żądanych luzów grupy selekcyjnej: maksymalnego (g) i minimalnego (h), które są jedy-nymi parametrami definiowanymi przez użytkownika. W przypadku korzystania z wygenerowanych pomiarów wartości tych luzów będą identyczne jak te wprowadzone w oknie generatora. Analizę i podział na grupy selekcyjne rozpoczyna się, naciskając przycisk **Przelicz** (o). Po krótkiej chwili odpowiednie pola tekstowe okna zapełnią się konkretnymi wynikami obliczeń:

- wartością wymiaru średniego (b) *otworów* i *wałków*,
- odchyleniem standardowym pojedynczego pomiaru (c),
- szerokością pola tolerancji rzeczywistej (d) *otworów* i *wałków*,
- wymiarami znajdującymi się w polu tolerancji (e), wykorzystywanymi do dalszej analizy,

- wymiarami znajdującymi się poza polem tolerancji (f), które nie będą uwzględniane w dalszej analizie,
- najmniejszą średnicą otworu (i),
- największą średnicą otworu (j),
- najmniejszą średnicą wałka (k),
- największą średnicą wałka (l),
- luzem maksymalnym serii (m),
- liczbą grup selekcyjnych.

Dodatkowo w prawej dolnej części okna zostanie wyświetlony podgląd (r) histogramów *otworów* (górnny) i *wałków* (dolny) pozwalający na szybką ocenę wykonanej selekcji i ewentualnej modyfikacji jej parametrów, np. luzów, od których, jedynie przy tych samych wynikach pomiarów, zależy podział na grupy selekcyjne. Po dokonaniu takiej zmiany wystarczy dokonać ponownego podziału na grupy, naciskając przycisk *Dziel na grupy* (p). Po zakończeniu selekcji okno można zamknąć przyciskiem *Zamknij* (q), a wszystkie wartości zostaną zachowane, aby w każdej chwili można było do nich powrócić.

Wynik procesu podziału na grupy selekcyjne prezentowany jest na *Histogramie* (rys. 1.13). Wybranie pozycji *Histogramy* (3) z menu programu MS2000 umożliwi wizualną ocenę przeprowadzonej selekcji.



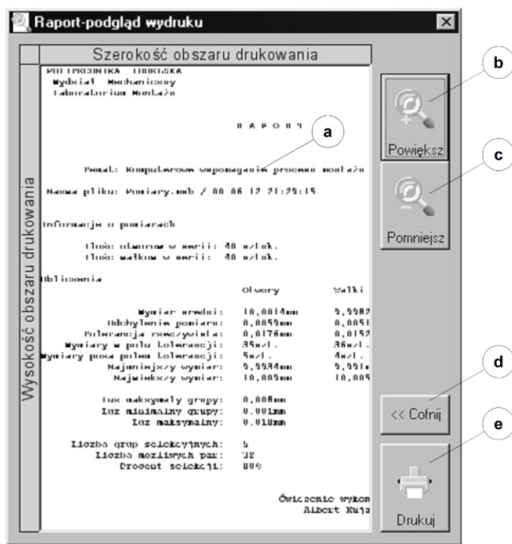
Rys. 1.13. Widok okna *Histogram*

Okno *Histogram* dostarcza użytkownikowi wielu istotnych danych o procesie selekcji, a przede wszystkim o procesie produkcyjnym. Z zamieszczonych w oknie histogramów *otworów* (a) i *wałków* (b) można sformułować wiele wniosków na temat pro-

cesów technologicznych i składających się na nich czynników: ustawienia obrabiarek, zużycia narzędzi itp. Dodatkowo histogramy informują o:

- liczbie elementów w poszczególnych grupach selekcyjnych,
- tolerancji grupy otworów (c),
- tolerancji grupy wałków (g),
- przedziałach wymiarowych grup selekcyjnych otworów (d),
- przedziałach wymiarowych grup selekcyjnych wałków (h),
- liczbie par *otworów* i *wałków* możliwych od uzyskania (e),
- efektywności selekcji (f).

Analizując przedziały wymiarowe grup selekcyjnych *otworów* i *wałków*, należy zwrócić uwagę na fakt, że dolna i górna granica każdej grupy *otworów* czy *wałków* nie reprezentuje konkretnego wymiaru średnicy wałka/otworu znajdującego się w wyznaczonym polu tolerancji rzeczywistej otworów. Może się tak zdarzyć, ale nie jest to regułą, dlatego że przedziały wymiarowe grup selekcyjnych wyznaczane są na podstawie wyliczonych tolerancji rzeczywistych serii *otworów* i *wałków* oraz deklarowanych luzów grupy selekcyjnej, a nie bezpośrednio z pomiarów. Rozwiązanie takie pozwala na precyzyjne i niezależne określenie liczby części w poszczególnych grupach selekcyjnych.



Rys. 1.14. Przykładowy wydruk raportu

Wszystkie uzyskane dotychczas wyniki obliczeń (selekcji) można przedstawić i utrwalić w postaci raportu (rys. 1.14).

1.3.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. WN PWN, Warszawa 1995.
2. Kujan A.: *Komputerowa analiza ilości grup w montażu selekcyjnym – opracowanie programu wspomagającego dobór par*. Praca magisterska pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. J. Kuczmaszewskiego. Lublin 2000.
3. Puff T., Sołtys W.: *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1980.
4. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
5. Richter E.: *Montaż w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1980.
6. Wierzchoń S.: *Technologia montażu*. WU Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.

2. Połączenia czopowo-cierne

Połączeniami czopowo-ciernymi określa się połączenia o gładkich walcowych lub stożkowych powierzchniach styku, oparte na odkształceniach sprężystych tych powierzchni wywołanych wciskiem, który powoduje docisk w polu styku [7]. Dzięki sile tarcia, która powstaje w tego rodzaju połączeniach, możliwe jest przenoszenie momentu skręcającego i siły wzdłużnej [5].

Połączenia czopowo-cierne można podzielić na:

- połączenia bezpośrednie, zwane też połączeniami wciskowymi,
- połączenia pośrednie, tj. uzyskane za pomocą łącznika wewnętrznego lub zewnętrznego.

Połączenia bezpośrednie ze względu na kształt powierzchni dzieli się na walcowe i stożkowe, a ze względu na sposób montażu na:

- wtlaczane,
- skurczowe,
- rozprężne,
- kombinowane.

Połączenia wtlaczane uzyskuje się przez wtlócenie przyłącza (czopa) do otworu drugiego przyłącza (oprawy lub obejmę) lub odwrotnie, tj. otworu oprawy na czop [2].

Połączeniami skurczowymi określa się połączenia uzyskane po nagraniu połączenia z otworem do temperatury umożliwiającej rozszerzenie otworu powyżej średnicy czopa, dzięki czemu można swobodnie wsunąć czop do otworu oprawy lub obejmę (lub nasadzić oprawę na czop) bez użycia dodatkowych urządzeń i narzędzi, jakie stosuje się przy połączeniach wtlaczanych (np. prasa lub młotek).

Połączenia rozprężne uzyskuje się po oziębieniu czopa do temperatury umożliwiającej zmniejszenie jego średnicy poniżej średnicy otworu oprawy, co umożliwia swobodne jego wsunięcie do tego otworu bez żadnych dodatkowych urządzeń.

Połączeniami kombinowanymi określa się te, w których występuje więcej niż jeden z wyżej wymienionych sposobów montażu (np. wtlaczanie uprzednio podgrzanej oprawy na prasie).

Połączenia pośrednie uzyskuje się za pomocą łącznika. W zależności od rodzaju łącznika można je podzielić na:

- rozłączne z łącznikami wewnętrznymi wciskanymi między czop a otwór, tj. z łącznikiem rozpierającym,
- zaciskowe z łącznikami zewnętrznymi dociągającymi przyłączy dzielone lub przecięte (oprawę na przyłączy – czopie).

2.1. Technologia połączeń czopowo-ciernych bezpośrednich

Połączenia bezpośrednie (wciskowe) należą do grupy powszechnie stosowanych w konstrukcjach maszyn i urządzeń. Wynika to z faktu, że posiadają wiele zalet, do których można zaliczyć [6]:

- proste sposoby wykonania przyłączy i montażu elementów łączonych,
- możliwość stosowania dużych obciążeń połączenia zarówno przy obciążeniach statycznych, dynamicznych, jak i mieszanych,
- poprawne i łatwe do uzyskania osiowanie elementów łączonych.

Do największych wad tych połączeń należą [8]:

- możliwość powstawania dużych naprężeń w elementach łączonych, co może być niebezpieczne w przypadku materiałów kruchych,
- możliwość zmiany wcisku przy zmianie temperatury w przypadku łączenia przyłączy wykonanych z materiałów o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej,
- osłabienie wytrzymałości zmęczeniowej czopa,
- zależność wartości wcisku od tolerancji wymiarów, kształtów i powierzchni czopa oraz otworu, jak też od współczynnika tarcia, które to wielkości mogą mieć znacznie zróżnicowane wartości,
- nieodporność na obciążenia powodujące odkształcenie powierzchni styku.

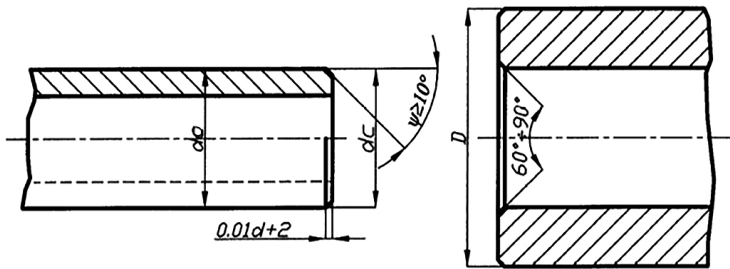
Połączenia wciskowe zalicza się do połączeń nierozłącznych kształtowych bezpośrednich. Połączenia wtlacane są w zasadzie rozłączne – prawidłowo wykonane przyłączy umożliwiają wielokrotne łączenie lub rozłączanie bez istotnego wpływu na właściwości połączenia. Połączenia skurczowe są praktycznie nierozłączne, gdyż rozdzielenie ich nawet przy częściowym ogrzewaniu jest na ogół trudne.

2.2. Charakterystyka wybranych właściwości mechanicznych połączeń wciskowych

Podstawową cechą połączeń wciskowych jest wartość wcisku, który po zmontowaniu elementów wywołuje odkształcenie sprężyste przyłączy i docisk na powierzchni styku [6]. Docisk ten w wyniku tarcia umożliwia przenoszenie momentu skręcającego i siły wzdłużnej.

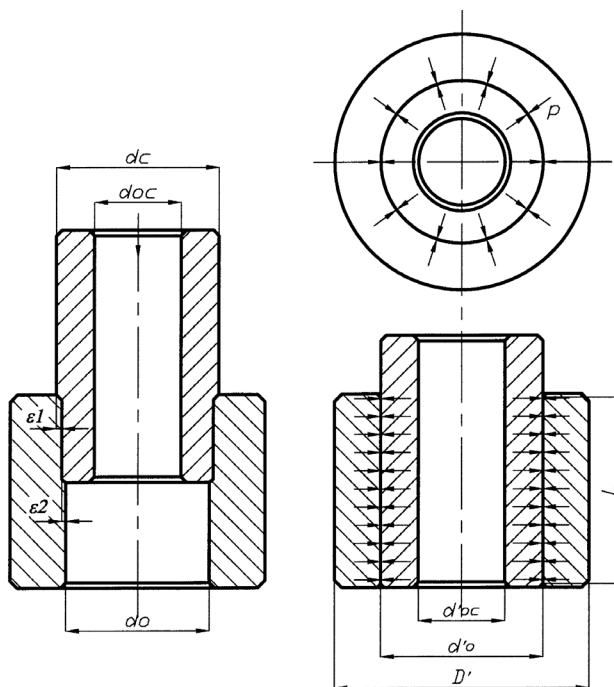
Niezbędny dla danego połączenia wcisk, tzw. wcisk mierzony W , określany jest podczas projektowania zespołu, przy założonych obciążeniach połączenia, jako dodatnia różnica średnicy zewnętrznej czopa d_c i wewnętrznej średnicy oprawy d_o (rys. 2.1).

$$W = d_c - d_o \quad (2.1)$$



Rys. 2.1. Schemat połączenia wciskowego przed montażem

Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat połączenia wciskowego po zmontowaniu.



Rys. 2.2. Schemat połączenia wciskowego po zmontowaniu

Sprowadza się to w zasadzie do doboru odpowiedniego pasowania według normy PN-EN ISO 286-1:2011. Do obliczeń wytrzymałościowych całego zespołu, jak również dla potrzeb montażu, niezbędne jest określenie wcisku skutecznego (zwanego też montażowym), co umożliwi określenie właściwego nacisku jednostkowego przy największych naprężeniach.

Warunek nośności połączenia obciążonego siłą poosiową P_o przedstawia zależność (2.2) – siła tarcia T , tj. siła styczna do powierzchni czopa, jaką może przenieść połączenie, powinna być większa (lub co najmniej równa) od siły obciążającej poosiowej P_o :

$$P_o \leq T = p\pi dl\mu \quad (2.2)$$

gdzie:

- p – nacisk jednostkowy na powierzchnię styku,
- d – średnica nominalna czopa i otworu,
- l – długość czynna połączenia,
- μ – współczynnik tarcia (tab. 2.1).

Tabela 2.1. Wartości współczynnika tarcia w połączeniach wciskowych

Material		Połączenia wtlaczone		
Czopa	Oprawy	Montaż	Demontaż	Obliczeniowe
Stal	Żeliwo	0,06 ÷ 0,14	0,09 ÷ 0,17	0,8
Stal	Stal, staliwo	0,06 ÷ 0,22	0,08 0,20	0,8
Stal	Stopy miedzi	0,05 ÷ 0,10	0,04 ÷ 0,10	0,8
Stal	Tworzywa polimerowe	ok. 0,5	ok. 0,3	0,3

W przypadku obciążenia połączenia momentem skręcającym warunek nośności określa wzór:

$$M_s \leq \frac{\pi}{2} d^2 l p \mu \quad (2.3)$$

Z warunków (2.2) i (2.3) można ustalić wymagany minimalny nacisk jednostkowy p_{wym} na powierzchni styku w warunkach eksploatacji:

$$p_{wym} = \frac{P_o}{\pi d l \mu} \text{ lub } p_{wym} = \frac{2M_s}{\pi d^2 l \mu} \quad (2.4)$$

Wartość tego nacisku określa rodzaj odkształceń części obejmowanej i obejmującej. Odkształcenia te mogą być albo sprężyste dla obu części, albo sprężyste dla jednej z nich i sprężysto-plastyczne dla drugiej. Opierając się na zadaniu Lamego i teorii sprężystości, można określić warunki występowania takich odkształceń [5] (tab. 2.2).

Tabela 2.2. Rodzaj odkształceń części obejmowanej i obejmującej

Rodzaj odkształceń	
części obejmowanej	części obejmującej
Sprężyste	
$\frac{p}{0,58Re_1} < \left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right]$	$\frac{p}{0,58Re_2} < \left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right]$
Sprężysto-plastyczne	
$\frac{p}{0,58Re_1} \geq \left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right]$	$\frac{p}{0,58Re_2} \geq \left[1 - \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \right]$
Legenda: Re_1 – granica plastyczności materiału części obejmowanej, Re_2 – granica plastyczności materiału części obejmującej, d_1 – średnica części obejmowanej, d_2 – średnica części obejmującej, d – średnica nominalna.	

W wyniku montażu powstaje tzw. wcisk montażowy skuteczny w , który jest sumą odkształceń sprężystych obu powierzchni styku przyłączy. W połączeniach włączanych, zwłaszcza gdy powierzchnie przyłączy są o stosunkowo dużej chropowatości ($R_z > 6,4 \mu\text{m}$), montażowy wcisk jednostkowy w jest mniejszy od skutecznego montażowego wcisku bezwzględnego W ($w < W$) o różnicę wynikającą ze zgniecenia powierzchni styku nierówności. Następuje więc wygładzenie stykających się powierzchni, powodujące osłabienie połączenia. W celu określenia wartości wcisku z uwzględnieniem mikrogeometrii powierzchni należy wprowadzić poprawkę na wygładzenie [5]:

$$w = W - 1,2(R_{z1} + R_{z2}) \quad (2.4)$$

gdzie:

R_{z1}, R_{z2} – wysokość profilu chropowatości powierzchni czopa i otworu oprawy.

W tabeli 2.3 zamieszczono informacje potrzebne do określenia parametru chropowatości R_z (PN-EN ISO 21920-2:2022-06) przy posługiwaniu się wzorcami chropowatości powierzchni. Poprawki tej nie uwzględnia się w połączeniach skurczowych i rozprężnych. Przedstawiona zależność, charakteryzująca niektóre właściwości mechaniczne połączeń, nie wyczerpuje zagadnienia. Inne dane, jak również wzory bazujące na teorii plastyczności, zawarte są w literaturze [1, 3].

Tabela 2.3. Chropowość powierzchni w zależności od sposobu obróbki

Sposób obróbki	Parametr R_a [μm]					
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,32
	Parametr R_z [μm]					
	40	20	10	6,3	3,2	1,6
Toczenie lub wytaczanie zgrubne	+	+				
Toczenie lub wytaczanie wykończeniowe		+	+	+		
Toczenie lub wytaczanie gładkościowe				+	+	+
Wiercenie i pogłębianie	+	+	+			
Rozwiercanie wstępne		+	+	+		
Rozwiercanie wykończeniowe			+	+	+	
Przeciąganie wstępne	+	+	+	+		
Przeciąganie wykończeniowe				+	+	+
Szlifowanie otworów zgrubne		+	+			
Szlifowanie otworów wykończeniowe				+	+	+
Szlifowanie wałków zgrubne		+	+	+		
Szlifowanie wałków wykończeniowe				+	+	+
Docieranie (lapping)					+	+
Docieranie pastą diamentową						+
Gładzenie (honing)						+
Dogładzanie (superfinish)						+
Docieranie chemiczno-mechaniczne				+	+	+
Polerowanie				+	+	+
Obróbka elektroiskrowa	+	+	+	+	+	+

Wartość nacisku jednostkowego na powierzchni styku oraz naprężeń zastępczych dla połączeń wciskowych (otwór oprawy – czop) określa się z zależności:

$$\sigma_z = kp = C\delta \quad (2.6)$$

gdzie:

- σ_z – największe naprężenie zastępcze w materiale danego przyłącza elementu (otworu oprawy lub czopa),
- k – współczynnik nacisku zależny od materiału i wartości stosunku odpowiednich wymiarów przyłączy (otwór oprawy – czop) (tab. 2.4),
- C – współczynnik wcisku zależny od tych samych czynników, co współczynnik k (tab. 2.5).

Tabela 2.4. Wartości współczynnika nacisku k

Otwór oprawy						
Material	Stosunek D/d_o					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Żeliwo	2,64	1,73	1,46	1,34	1,27	1,23
Stal lub staliwo	3,22	2,33	2,07	1,95	1,89	1,85
Czop						
Material	Stosunek d_c/d_{oc}					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0*
Stal lub staliwo	3,60	2,67	2,38	2,25	2,18	–

* Przy czopie pełnym (powyżej $d_c/d_{oc} = 3,5$) wartości k się nie wyznacza

Tabela 2.5. Wartości współczynnika wcisku C [MPa × 10⁴]

Material oprawy	D/d _o	Czop stalowy lub staliwny					
		Stosunek d_c/d_{oc}					
		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	Czop pełny
Żeliwo	1,5	6,60	7,41	7,71			
	2,0	5,67	6,13	7,00	7,85	7,93	
	2,5	5,27	6,27	6,66	7,17	7,28	
	3,0	5,07	6,07	6,48	6,86	6,97	
	3,5	4,95	5,97	6,39	6,68	6,71	8,14
	4,0	4,87	5,91	6,33	6,59	6,71	7,55
			15,8	17,0	6,54	6,65	7,27
					17,6	17,9	7,10
					16,8	17,2	7,02
							6,98
Stal lub staliwo							18,8
							18,4
							19,3
							18,2
							18,2
							18,2
	1,5	14,5					18,2
	2,0	17,7	16,8	16,4			
	2,5	19,0	18,4	18,1			
	3,0	19,6	19,2	19,0	18,0	17,9	
3,5	20,0	19,7	19,6	18,9	18,8		
4,0	20,3	20,0	19,9	19,5	19,4		
				19,9	19,8		

Uwaga: wartość współczynnika C obliczono przy założeniu, że moduł sprężystości stali jest równy $E = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa] moduł sprężystości staliwa – 10^5 [MPa], przy czym liczba Poissona dla stali i żeliwa wynosi 0,3; wartości podane poniżej linii dotyczą przypadku, gdy czop ma mniejszą wytrzymałość niż staliwna piasta

2.3. Wykonanie ćwiczenia

2.3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z technologią montażu połączeń czopowo-ciernych. Określenie siły przenoszonej przez połączenia poprzez dokonanie pomiarów wielkości geometrycznych i przeprowadzenie obliczeń. Weryfikacja uzyskanych wyników obliczeń poprzez praktyczne wykonanie montażu i demontażu połączeń włączanych wraz z rejestracją siły w funkcji względnego przemieszczenia łączonych części.

2.3.2. Program realizacji ćwiczenia

W celu poprawnego wykonania ćwiczenia należy:

- przeprowadzić ocenę chropowatości powierzchni czopa i otworu pierścienia,
- dokonać pomiarów średnic zewnętrznej czopa i wewnętrznej pierścienia,
- wyznaczyć siłę niezbędną do zmontowania zespołu,
- przeprowadzić montaż i demontaż połączenia czopowo-ciernego wraz z rejestracją przebiegu siły w funkcji względnego przemieszczenia,
- sporządzić wykres siły włączania i rozłączania w funkcji wcisku mierzonego,
- sporządzić wykres siły włączania w funkcji wcisku mierzonego z zaznaczeniem punktu charakterystycznego dla badanego zespołu.

2.3.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

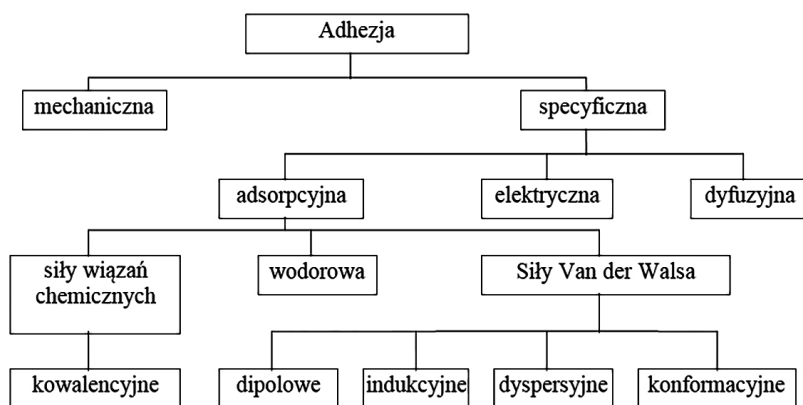
1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Banaszek J.: *Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn – cz. II*. WU Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996.
2. Bartosiewicz J.: *Technologia dla mechanika obróbki skrawaniem*. WSiP, Warszawa 1989.
3. Dietrich M.: *Podstawy konstrukcji maszyn – tom II*. WNT, Warszawa 1995.
4. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. WN PWN, Warszawa 1995.
5. Puff T., Soltys W.: *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1980.
6. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
7. Richter E.: *Montaż w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1980.
8. Wierchoń S.: *Technologia montażu*. WU Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.

3. Połączenia klejowe metali i stopów metali

Wytrzymałość połączeń klejowych związana jest ze zjawiskami adhezyjnymi występującymi w procesie klejenia [5, 6, 9, 10]. W celu właściwego zrozumienia problemu niezbędne jest poznanie zjawisk opisujących proces szepiania, czyli zjawisk powierzchniowych prowadzących do powstania nowego układu. Dla połączeń klejowych nowy układ cechuje zbiór szczególnych charakterystyk związanych z właściwościami kleju i materiałów łączonych oraz występowania granicy rozdziału między nimi. Jednym z takich zjawisk jest zjawisko adhezji. Na rysunku 3.1 przedstawiono podział teorii adhezji, które powstawały i rozwijały się na przestrzeni lat.

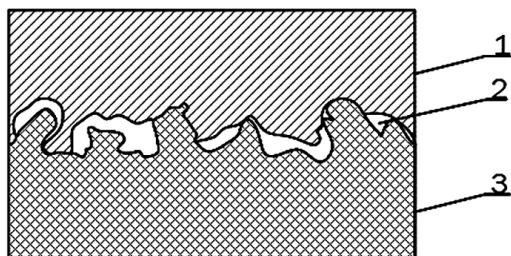


Rys. 3.1. Klasyfikacja teorii adhezji i sił wiązań adhezyjnych [12]

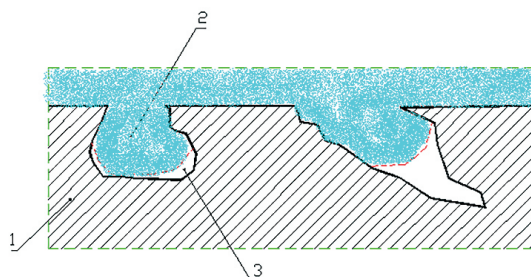
Najogólniej rozróżnia się adhezję mechaniczną i specyficzną (właściwą), przy czym w warunkach rzeczywistych nie występują one w czystych postaciach. Najczęściej dominuje adhezja właściwa przy równoczesnym udziale adhezji mechanicznej.

Adhezja mechaniczna

Twórcą tej teorii jest Mc Bain [15]. Teoria ta opiera się na spostrzeżeniu, że wytrzymałość złączeń klejowych zwiększa się wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni łączonych materiałów. Polega ona na przenikaniu kleju do porów i nierówności klejonych powierzchni i wytwarzaniu po utwardzeniu w kapilarach podłoża wiążących mostków. Jest więc wynikiem oporu, jaki stawia sile zewnętrznej masa klejowa będąca w postaci stałej w wyniku zakotwiczenia mechanicznego (rys. 3.2). Wraz ze zwiększeniem chropowatości powierzchni danego materiału następuje zwiększenie liczby wgłębień i rys, a tym samym zwiększenie powierzchni geometrycznej klejenia. Do powstałych wgłębień o nieregularnym kształcie może wnikać klej, wypełniając pory (rys. 3.3).



Rys. 3.2. Schemat złącza adhezyjnego o rozwiniętej powierzchni dwóch łączonych za pomocą kleju ciał stałych, ilustrujący mechaniczną teorię adhezji, 1, 3 – łączone elementy, 2 – warstwa kleju [15]



Rys. 3.3. Schematyczne przedstawienie istoty adhezji mechanicznej, 1 – materiał klejony; 2 – klej; 3 – niewypełnione przez klej dna wgłębień i porów

Stopień penetracji kleju zależy głównie od jego lepkości, temperatury, ciśnienia, czasu wnikania, a także wymiarów geometrycznych wgłębień. Mechaniczna teoria adhezji zakłada, że złącza utworzone przez klej z materiałem nie ulegają dekohezji na granicy faz pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Dekohezja może wystąpić wyłącznie wewnątrz najslabszego materiału złącza. A zatem o wytrzymałości złącza decyduje wytrzymałość kleju lub łączonych materiałów, a nie zjawiska zachodzące na granicy obu faz. Rozwinięcie w sposób mechaniczny powierzchni klejenia nie zwiększa adhezji tylko w wyniku zakotwiczeń utwardzonego kleju w nierównościach powierzchni. Wpływa także między innymi na stopień wysycenia sił międzycząsteczkowych, a więc także na adhezję właściwą. Adhezja mechaniczna w sposób istotny decyduje o efektach klejenia materiałów porowatych ze względu na znacznie większą powierzchnię kontaktu z klejem niż w przypadku materiału, który ma powierzchnię gładką.

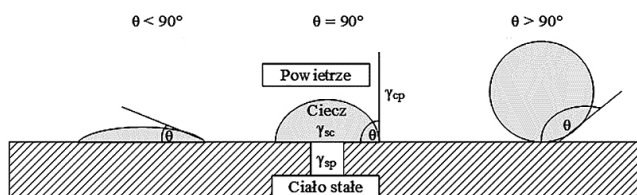
Adhezja specyficzna

Twórcami tej teorii są N.A. de Bruyne (1944 r.) oraz A.D. McLaren (1949 r.) [4]. Obejmuje ona teorie: adsorpcyjną, elektryczną oraz dyfuzyjną. Adhezja specyficzna jest wynikiem oddziaływania sił przyciągania pomiędzy powierzchnią łączoną a spo-

iwem. Są to siły międzycząsteczkowe i atomowe. Międzycząsteczkowe przyciąganie na granicy styku różnorodnych materiałów to wynik kompleksowych oddziaływań na granicy faz. Według tej teorii utworzenie trwałego połączenia jest możliwe dzięki oddziaływaniu walencyjnych sił międzycząsteczkowych występujących między stykającymi się powierzchniami.

Teoria adsorpcyjna

Model teorii adsorpcyjnej oparty jest na założeniu, że po dostatecznym zbliżeniu ciała stałego i cieczy na granicy faz pojawiają się oddziaływania międzycząsteczkowe, w wyniku których ciała będą do siebie przylegać z pewną siłą. Mając do czynienia z granicą faz ciało stałe/ciecz, zasadniczym warunkiem dużej adhezji staje się dobra zwilżalność podłoża. Miarą zwilżalności jest kąt zwilżania θ . Na rysunku 3.4 zaprezentowano graficznie schematyczne znaczenie kąta zwilżania θ .



Rys. 3.4. Graficzna interpretacja pojęcia kąta zwilżania

Gdy $\theta > 90^\circ$ ciecz nie zwilża powierzchni ciała stałego, a gdy $\theta \rightarrow 0^\circ$ występuje zwilżalność absolutna, co oznacza, że ciecz samoistnie rozplywa się po powierzchni. W pierwszym przypadku powierzchnia kontaktu jest minimalna, a w drugim maksymalna. W świetle tej teorii drugi przypadek sprzyja silniejszym oddziaływaniom międzyfazowym. Oddziaływania te są związane ze swobodną energią powierzchniową materiału i kleju. Energia powierzchniowa jest wyrażona przez pracę potrzebną do utworzenia jednostkowej powierzchni podczas rozdziału faz znajdujących się w równowadze. Równowagę zwilżalności można sformułować według zależności (3.1):

$$\gamma_s = \gamma_{sc} + \gamma_{cp} \cos \theta \quad (3.1)$$

gdzie:

- γ_s – swobodna energia powierzchniowa ciała stałego,
- γ_{sc} – napięcie międzyfazowe na granicy faz ciało stałe/ciecz,
- γ_{cp} – napięcie międzyfazowe na granicy ciecz/powietrze,
- θ – kąt zwilżania.

Napięcie powierzchniowe cieczy i napięcie międzyfazowe można powiązać z oddziaływaniami adhezyjnymi wyrażonymi jako praca adhezji W_a (3.2):

$$W_a = \gamma_s + \gamma_c - \gamma_{sc} \quad (3.2)$$

lub w postaci uproszczonej, określanej jako równanie Younga-Dupré (3.3) [137]:

$$W_a = \gamma_c (1 + \cos\Theta) \quad (3.3)$$

gdzie:

γ_c – napięcie powierzchniowe cieczy.

W_a osiąga maksimum, gdy $\gamma_{sc} \rightarrow 0$. Na tej podstawie sformułowano warunek dobrej zwilżalności podłoża przez klej i silnych oddziaływań adhezyjnych, zgodnie z którymi swobodna energia powierzchniowa materiału powinna być większa od swobodnej energii powierzchniowej kleju.

Zwykle w adsorpcyjnej teorii adhezji największe znaczenie przypisuje się siłom Van der Waalsa, które najmocniej działają w kryształach i cieczach, a najslabiej w gazach. Siły te są tym większe, im bliżej siebie znajdują się cząstki. Wśród sił międzycząsteczkowych można wyróżnić pięć głównych grup sił:

- dipolowe,
- indukcyjne,
- dyspersyjne,
- konformacyjne,
- multipolowe.

Oprócz wymienionych powyżej sił van der Waalsa, w adsorpcyjnej teorii adhezji wymienia się także siły wiązań chemicznych. Wiązania chemiczne są następstwem przebudowy struktury elektronowej atomów przylegających do siebie ciał. Biorące udział w tworzeniu tych wiązań elektrony określane są mianem elektronów walencyjnych. Efekt działania sił wiązań chemicznych zależy od aktywności chemicznej cząstek zaadsorbowanych i stanu energetycznego powierzchni. Wśród wiązań chemicznych można wyróżnić:

- wiązania kowalencyjne (atomowe, w tym kwasowo-zasadowe określane także jako donorowo-akceptorowe),
- jonowe,
- wodorowe.

Różnią się one przede wszystkim zmianą sposobu przebudowy struktury elektronowej łączących się atomów. Jest to przyczyną dużego zróżnicowania energii potencjalnej tych wiązań.

Elektryczna teoria adhezji

Zgodnie z elektryczną teorią adhezji pomiędzy dwoma różnymi materiałami może nastąpić przepływ strumienia elektronów, jeżeli ciała te zostaną doprowadzone do bezpośredniego kontaktu. Natężenie i czas przepływu zależą od odległości, na jaką zbliżono te materiały, oraz od różnicy prac wyjścia elektronów z analizowanych materiałów. Przepływ elektronów zwiększa się wraz ze wzrostem elektryczności zbliżonych do

siebie materiałów. Efektem tego przepływu jest utworzenie się nadmiarowego ładunku dodatniego, który stanowią jony dodatnie osadzone w warstwie wierzchniej. W warstwie wierzchniej materiału bardziej ujemnego natomiast powstaje nadmiarowy ładunek ujemny, utworzony przez przemieszczające się tam elektrony. W wyniku tego jedna z warstw staje się względnie uboższa w elektrony, co prowadzi do powstania podwójnej warstwy elektrycznej powodującej efekt przyciągania.

Siły przyciągania mają charakter sił opisywanych prawem Coulomba. Przeciwdziałają one rozdzieleniu obu materiałów tworzących połączenie i dlatego uznano je za jedną ze składowych sił adhezji. Wielkość tych sił przypadająca na jednostkę powierzchni tak powstałego połączenia zależy głównie od gęstości ładunku powierzchniowego w obu częściach podwójnej warstwy elektrycznej.

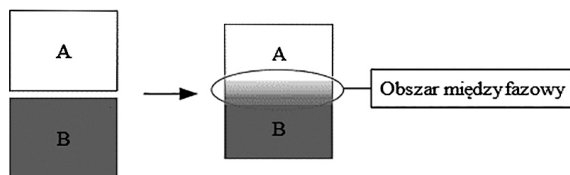
Teoria ta ma ścisły związek z teorią adsorpcyjną, gdyż przejścia elektronów wywołuje orientowana adsorpcja grup polarnych kleju na powierzchni ciała łączonego, co związane jest z obecnością i ilością grup polarnych. Elektryczna teoria adhezji, choć nie ma znaczenia podstawowego, to jednak dobrze tłumaczy niektóre aspekty zjawiska adhezji.

Dyfuzyjna teoria adhezji

Dyfuzję można traktować jako rodzaj zjawiska mechanicznego na poziomie molekularnym. Teoria dyfuzyjna zakłada, że zjawisko adhezji polega na wzajemnym przenikaniu atomów kleju do podłoża i podłoża do kleju. Przyczyną dyfuzji jest różnica potencjałów termodynamicznych cząstek w obydwóch przylegających do siebie materiałach. W wyniku zmiany wzajemnego położenia atomów i cząstek znajdujących się w obszarze międzyfazowym następuje wyrównanie tych potencjałów. Prowadzi to do stanu równowagi termodynamicznej układu. Natężenie i szybkość procesów dyfuzji zależy od ilorazu dwóch składowych potencjału termodynamicznego: energetycznej i entropijnej. W niektórych przypadkach energia wewnętrzna układu nie ulega zmianie podczas dyfuzji.

Proces dyfuzji zależy przede wszystkim od rodzaju przylegających materiałów oraz temperatury i ciśnienia. Zaletą dyfuzyjnych połączeń adhezyjnych są ograniczone naprężenia własne w strefie międzyfazowej. Także zmiana właściwości fizycznych, przy przejściu z jednej fazy do drugiej, nie ma charakteru skokowego. Jednak należy nadmienić, że niewiele materiałów posiada zdolność do tworzenia dyfuzyjnych połączeń adhezyjnych.

Teoria dyfuzyjna może być wykorzystywana do interpretacji zjawisk wyłącznie w połączeniach, w których występuje jednakowa lub zbliżona rozpuszczalność obu materiałów (np. w których klej przynajmniej częściowo rozpuszcza materiał podłoża). Dlatego zakładając, że dwa materiały są wzajemnie w sobie rozpuszczalne i znajdują się w bezpośrednim kontakcie, to w wyniku dyfuzji po pewnym czasie makrocząsteczki obu materiałów zaczną dyfundować i jednocześnie przestanie istnieć granica faz, a pojawi się obszar międzyfazowy, jak to przedstawiono schematycznie na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Schematyczne wyjaśnienie powstawania obszaru międzyfazowego

Utworzony obszar międzyfazowy nie może być traktowany jako płaszczyzna przenosząca naprężenia. Podczas tworzenia połączeń adhezyjnych ze skutkiem działania procesu zjawiska dyfuzji wymagane jest spełnienie następujących warunków:

- duże powinowactwo kleju do podłoża (chemiczne, strukturalne i geometryczne),
- obecność rozpuszczalnika spęczniającego powierzchnię substratu,
- ciężar cząsteczkowy związku penetrującego powinien być mniejszy od 3000 Da ($4,98159 \times 10^{-21}$ g).

Takie połączenia występują przy łączeniu niektórych tworzyw polimerowych. Dyfuzja między tymi materiałami może zachodzić jedynie wówczas, gdy znajdują się one w temperaturze wyższej niż temperatura ich zeszklenia. Innym przykładem materiałów, w których może zachodzić zjawisko dyfuzji, jest drewno.

Teoria dyfuzyjna adhezji odnosi się także do złączy adhezyjnych, w których następuje częściowe rozpuszczenie warstwy wierzchniej obu tworzyw. Dzięki temu makrocząsteczki posiadają swobodę ruchu i mogą wzajemnie dyfundować. Po usunięciu rozpuszczalnika ich swoboda ruchu zostaje ograniczona, a utworzone w ten sposób złącze ma dużą wytrzymałość.

3.1. Charakterystyka procesu klejenia

W każdym procesie klejenia można wyróżnić kilka podstawowych etapów:

- przygotowanie powierzchni,
- sporządzanie kleju,
- nanoszenie kleju,
- podsuszanie (w przypadku klejów kauczukowych),
- składanie łączonych elementów,
- powstawanie spoiny klejowej,
- operacje uzupełniające,
- kontrola jakości.

Poniżej opisano pokrótce każdy z poszczególnych etapów procesu klejenia.

Przygotowanie powierzchni

Przygotowanie powierzchni ma zasadniczy wpływ na jakość połączenia i jest uzależnione od rodzaju łączonych materiałów. Właściwe przygotowanie powierzchni

w procesie klejenia determinuje poprawne wykonanie połączenia klejowego oraz uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości połączenia, a w konsekwencji warunkuje prawidłową eksploatację połączenia w określonych warunkach, a także zwiększa odporność połączenia na działanie różnorodnych czynników eksploatacyjnych. Etap ten w znacznym stopniu decyduje o prawidłowej pracy połączenia. Powinien on zapewnić uzyskanie jak najsilniejszych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym. W tym celu należy:

- usunąć wszystkie zanieczyszczenia z powierzchni łączonych elementów (takie jak: tłuszcze, pyły, smary, mikroorganizmy, pęcherzyki gazów, luźno związane warstwy korozyjne), które w znacznym stopniu mogą wpłynąć na obniżenie siły wiązań adhezyjnych,
- uzyskać właściwe „rozwiniecie” powierzchni,
- uzyskać dobre uaktywnienie powierzchni łączonych elementów.

Dobór sposobu przygotowania powierzchni zależy od wielu czynników, między innymi od rodzaju, właściwości i struktury stereometrycznej powierzchni łączonych materiałów. Zależnie od właściwości materiałów, warunków techniczno-technologicznych, możliwości warsztatowych i innych proces przygotowania powierzchni może być złożony z różnych operacji:

- oczyszczenie i odtłuszczenie powierzchni,
- obróbka specjalna,
- czynności bezpośrednio poprzedzające utworzenie połączenia.

Odtłuszczenie ma na celu usunięcie z powierzchni zanieczyszczeń, do których należą: zabrudzenia olejem, smarem, wilgoć i inne niepożądane substancje utrudniające w dalszych procesach uaktywnienie powierzchni. Odtłuszczenie powierzchni przeprowadzać można ręcznie w przypadku produkcji jednostkowej lub w przypadku skomplikowanego kształtu elementu odtłuszczanego. Ten rodzaj odtłuszczenia jest stosunkowo niedoskonały i czaso- oraz pracochłonny, dlatego odtłuszczenie najczęściej odbywa się w kąpielach rozpuszczalników albo ich oparach. Do odtłuszczenia można zastosować różnorodne rozpuszczalniki (np. aceton, benzynę). Gdy do odtłuszczenia używa się wody, należy sprawdzić, czy oczyszczane tworzywo chłonie wodę – czy jest hydrofilne. Jeśli tak, to czynnością poprzedzającą musi być usunięcie wody, np. przez wysuszenie, które może być realizowane w otaczającym powietrzu, w strumieniu powietrza (może być ogrzane do temperatury 40–50°C), w atmosferze gazu obojętnego (np. azotu, argonu) lub w suszarce komorowej.

Celem obróbki specjalnej powierzchni jest odpowiednie rozwinięcie powierzchni oraz zwiększenie jej aktywności fizykochemicznej. Do obróbek specjalnych powierzchni można zaliczyć metody mechaniczne, chemiczne, laserowe, plazmowe, elektrochemiczne i inne.

Wśród metod mechanicznych można wymienić m.in.: obróbkę ścierną, obróbkę strumieniowo-ścierną (np. piaskowanie, śrutowanie), kulkowanie, skrobanie, szrotkowanie, szlifowanie. Metoda ta umożliwi ukonstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni, jednak nie gwarantuje dobrego uaktywnienia powierzchni.

Metody chemiczne pozwalają na odpowiednie rozwinięcie powierzchni i warstwy powierzchniowej o składzie chemicznym zapewniającym dużą aktywność fizykochemiczną powierzchni w stosunku do stosowanego kleju. Obróbka chemiczna najczęściej polega na trawieniu powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia w kąpielach o odpowiednim składzie i w określonej temperaturze. Ważny jest również czas trawienia.

Kolejną po czyszczeniu i obróbce ubytkowej techniką modyfikacji powierzchni do celów klejenia jest nanoszenie powłok. Oczyszczenie powierzchni metodami opisanymi wcześniej wymaga niemalże natychmiastowego wykonania połączenia klejowego. W sposób podobny do powłok stosowane są również tzw. primery. Często są to rozcieńczone w organicznym rozpuszczalniku roztwory klejów lub substancji chemicznie podobnych do kleju, które tworzą na powierzchni jednolitą warstwę o zdecydowanie lepszych właściwościach adhezyjnych niż lity materiał wyjściowej powierzchni. Efektywność primerów, w szczególności inhibitorów korozji, jest zależna od grubości nałożonej warstwy. W przypadku stosowania z niektórymi klejami – zmiana grubością warstwy primera z przedziału 2–5 μm do ok. 8–10 μm może skutkować dwukrotnym zmniejszeniem wytrzymałości spoiny na odrywanie.

Prawidłowo przygotowana powierzchnia do procesu klejenia powinna charakteryzować się:

- brakiem zanieczyszczeń redukujących adhezję,
- dobrą zwilżalnością klejem,
- zdolnością do wytworzenia wiązań międzyfazowych,
- stabilnością dla założonych warunków i czasów eksploatacji połączenia,
- powtarzalnością uzyskiwanych właściwości,
- obecnością aktywatorów/środków proadhezyjnych (o ile są wymagane).

Sporządzanie kleju

Proces sporządzania klejów jest uzależniony od wielu czynników związanych zarówno z rodzajem klejów, ilością składników, postacią kleju oraz sposobem dozowania, jak i wielu innych.

Kleje wieloskładnikowe składają się z wielu składników, m.in.: z żywicy (substancji klejącej), utwardzacza, aktywatora lub katalizatora procesu sieciowania, substancji modyfikujących i innych składników. Przed naniesieniem kleju na łączone powierzchnie wybrane składniki należy połączyć w odpowiednich proporcjach, ponieważ zarówno nadmiar, jak i niedobór składowych elementów kompozycji klejowej może prowadzić do niewłaściwego usieciowania kleju, a taki przypadek skutkuje wytworzeniem spoiny klejowej o niskiej wytrzymałości.

Po dokładnym odmierzeniu składników kleju należy je dokładnie wymieszać, aby uzyskać jednorodną masę klejową. W tym celu stosuje się różnego rodzaju mieszalniki. Obecnie znanych jest wiele odmian konstrukcyjnych mieszalników, ponieważ

o budowie mieszalnika decyduje nie tylko rodzaj mieszadła, ale również typ zbiornika mieszalnika. Konstrukcja mieszadła odgrywa niewątpliwie najważniejszą rolę w pracy mieszalnika, dlatego poniżej wymieniono ważniejsze typy mieszadeł wykorzystywanych podczas przygotowywania kompozycji klejowych.

Podział mieszadeł jest umowny i zależy od przyjętego kryterium podziału. Jeżeli za podstawę podziału przyjęć zakres częstości obrotów, przy których może mieszadło pracować, będą to mieszadła:

- wysokoobrotowe,
- niskoobrotowe.

Jeżeli za podstawę podziału przyjęć profil prędkości cieczy w mieszalniku, będą to mieszadła:

- wytwarzające promieniowy strumień cieczy,
- wytwarzające osiowy strumień cieczy,
- wytwarzające okrężny (styczny) strumień cieczy.

Jeśli kryterium podziału będzie konstrukcja mieszadła, to będą to np. mieszadła:

- turbinowe,
- śmigłowe,
- łapowe,
- kotwicowe,
- ramowe,
- ślimakowe,
- wstęgowe,
- tarczowe itp.

Istotnym elementem procesu sporządzania kompozycji klejowej, a szczególnie podczas procesu mieszania, jest unikanie wprowadzania do niej pęcherzy powietrza. Obecność tych pęcherzy po procesie utwardzania w utworzonej spoinie klejowej może negatywnie wpłynąć na właściwości wytrzymałościowe połączenia klejowego. Jeżeli jednak sporządzona masa klejowa jest zbyt napowietrzona, należy poddać ją procesowi odpowietrzenia, podczas którego pęcherze powietrza zostaną usunięte. Podczas tej operacji należy szczególną uwagę zwrócić na ważny czynnik, jakim jest czas życia kleju. Jest to czas liczony od momentu przygotowania, w ciągu którego klej zachowuje swoje właściwości. Ponadto podczas tego etapu należy mieć na względzie również reaktywność sporządzanej kompozycji klejowej, ponieważ może znacząco wpływać na proces sieciowania kleju.

W etapie przygotowania kleju istotne jest również odpowiednie przygotowanie składowych kleju. W przypadku klejów topliwych, które występują w postaci m.in. taśm, granulek, prętów, przed naniesieniem na klejone powierzchnie należy je podgrzać. Podgrzanie składników kleju może być wykorzystane nie tylko w przypadku klejów topliwych, ale również tam, gdzie lepkość stosowanych materiałów jest wysoka i możliwość ich stosowania jest utrudniona. Podgrzanie składników kompozycji klejo-

wej powoduje spadek lepkości, a tym samym w późniejszym etapie klejenia polepsza zwilżalność powierzchni. Niektóre kleje, nazywane klejami jednoskładnikowymi, są dostarczane w postaci gotowej do użycia.

Nanoszenie kleju

Istotną czynnością po procesie przygotowania kompozycji klejowej jest nakładanie kleju na łączone powierzchnie. Nakładanie warstwy kleju zależne jest od wielu czynników, takich jak:

- postać kleju,
- właściwości kleju, w szczególności jego lepkość,
- rodzaj, wielkość i ukształtowanie powierzchni łączonych elementów,
- dostępność do wykonywanego połączenia,
- metoda montażu,
- rodzaj produkcji,
- możliwości warsztatowych.

Wyróżnia się dwie podstawowe metody dozowania i nakładania kleju: ręczną i automatyczną. Ręczne nanoszenie klejów stosowane jest najczęściej w przypadku klejenia niewielkich powierzchni, w produkcji jednostkowej, w warunkach warsztatowych. W przypadku klejów w postaci płynnej nanoszenie ich na powierzchnie klejone może odbywać się za pomocą wałków, pędzli wykonanych z naturalnego włosia o średniej sztywności. W przypadku klejów o większej lepkości do aplikacji klejów można wykorzystać szpachelki malarskie. Geometria szpachelki powinna być dobrana w zależności od gęstości kleju, np. w przypadku klejów w postaci pasty krawędzie szpachelki powinny posiadać nacięcia w kształcie ząbków, aby możliwe było uzyskanie równomiernej warstwy. Do nakładania klejów mogą być stosowane również pistolety wyposażone w dysze dozujące. Pozwalają one aplikować kleje na powierzchnie o zróżnicowanej wielkości lub konieczności ograniczenia miejsca nakładania klejów. Metoda automatycznego nakładania kleju, szczególnie w produkcji seryjnej lub masowej, może być realizowana z zastosowaniem rozpylaczy szczelinowych, powłokarek jedno- lub dwuwalcowych, nakładarek kurtynowych, również hydraulicznych, pneumatycznych lub elektrostatycznych urządzeń do rozpylania kleju.

Składanie łączonych elementów

W celu poprawnego wykonania połączenia klejowego konieczne jest dokładne i staranne złożenie oraz ustalenie powierzchni sklejanых elementów. Jednym z wymogów technologicznych, jakie powinny spełniać elementy przeznaczone do klejenia, jest przywieranie ich powierzchni styku bez wywierania dużych nacisków. Ważnym aspektem, który wpływa na poprawność wykonania podczas ustalania i składania połączeń, jest kształt łączonych elementów, czy są to elementy płaskie, czy walcowe, oraz rodzaj wykonywanego połączenia, czy to jest połączenie zakład-

kowe, doczołowe itd. Jest to ważne z tego powodu, że aspekt ten determinuje wybór rodzaju elementów ustalających oraz sposobu ich rozmieszczenia. Ponadto konieczna jest analiza miejsca położenia połączenia w konstrukcji, gdyż niekiedy jest wymagane zaprojektowanie i wykonanie dodatkowego oprzyrządowania specjalnego. Ustawienie klejonych elementów w określonym położeniu przeprowadza się najczęściej za pomocą specjalnych przyrządów, które wyposażone są w odpowiednie elementy ustalające oraz dociskowe. Ich zadaniem jest zapewnienie powtarzalności wymiarowo-kształtowej wykonywanych połączeń. Do uzyskania odpowiedniego ustalenia łączonych części stosuje się odpowiednie elementy ustalające, np. kołki ustalające, nity, śruby, sworznie, podstawki pryzmowe, ustalacze pryzmowe itp. Oprócz typowych elementów ustalających często w tym etapie procesu klejenia stosowane jest oprzyrządowanie dostosowane do określonych połączeń.

W operacji złożenia połączeń klejowych szczególną uwagę zwraca się również na wartość nacisku wywieranego na klejone materiały. Dobór odpowiedniej wartości nacisku podczas klejenia uzależniony jest od właściwości kleju, szczególnie jego gęstości, lepkości, skurczu termicznego i chemicznego skurczu utwardzania oraz od rodzaju sklejanego materiału i sposobu przygotowania ich powierzchni do klejenia. Ciśnienie w procesie klejenia sprzyja procesowi zwilżania, zwłaszcza przy wypełnianiu mikroporów i mikronierówności powierzchni. Dzięki temu umożliwia się rozprowadzanie kleju oraz właściwe ustalenie łączonych elementów. Nacisk powinien zapewnić dokładne przyleganie do siebie łączonych elementów oraz optymalną grubość spoiny klejowej (0,05–0,20 mm). Zbyt duża siła docisku lub niewłaściwe rozmieszczenie elementów dociskowych w obszarze klejenia może powodować deformację łączonych konstrukcji. Zbyt duży nacisk może powodować również uzyskanie zbyt cienkiej warstwy kleju oraz możliwość powstawania miejsc bezpośredniego styku materiałów klejowych. Natomiast zbyt mały nacisk może być przyczyną grubej i niejednorodnej, porowatej spoiny. Jeśli w operacji klejenia wykorzystywany jest klej w postaci stałej lub o znacznej lepkości, wówczas wymagane naciski klejenia osiąga się w masie klejowej płynnej, dlatego konieczne jest podgrzanie kleju do temperatury powyżej temperatury jego topliwości.

Nacisk wywierany w procesie technologicznym klejenia podczas utwardzania spoiny klejowej może być realizowany różnymi metodami, wykorzystującymi przyrządy przeznaczone do tego celu:

- mechanizmy dźwigowe,
- mechanizmy sprężynowe,
- mechanizmy hydrauliczne,
- urządzenia próżniowe,
- komory ciśnieniowe,
- docisk magnetyczny.

Wymienione przyrządy, pomimo odmiennej budowy i przeznaczenia, mają na celu spełnienie określonych wymagań, wśród których można wyróżnić:

- wytworzenie odpowiedniej siły docisku łączonych powierzchni,
- zagwarantowanie niezmienności położenia klejonych elementów w trakcie utwardzania spoiny klejowej,
- uzyskanie powtarzalności wymiarowej wykonywanych połączeń,
- elementy dociskowe urządzeń do wywierania ciśnienia nie powinny wywierać nacisku punktowego, ale powierzchniowy.

Wartość stosowanego ciśnienia w procesie klejenia zależy od tego, czy klej ulega utwardzeniu w wyniku polimeryzacji kondensacyjnej (wówczas nacisk powinien wynosić 1 MPa), czy też w inny sposób (wówczas nacisk powinien oscylować w granicach 0,05 MPa).

Powstawanie spoiny klejowej

Istotnym czynnikiem wpływającym na jakość połączenia jest proces powstawania spoiny klejowej. Powstawanie spoiny połączenia jest procesem, w którym ciepla lub uplastyczniona masa kleju przechodzi w stan stały, przez co uzyskuje żadaną wytrzymałość. Proces ten przebiega zwykle według jednego z niżej wymienionych mechanizmów:

- utrata rozpuszczalnika przez odparowanie – typowymi klejami tworzącymi spoinę w ten sposób są kauczukowe kleje rozpuszczalnikowe i dyspersje polioctanu winylu,
- zestalanie – tworzenie spoiny wskutek ochłodzenia uprzednio stopionego kleju poniżej jego temperatury mięknięcia. W ten sposób spoinę tworzą kleje topliwe oraz w postaci folii,
- sieciowanie żywicy – jest to proces typowy dla żywic epoksydowych i fenolowych. Proces ten wymaga zastosowania utwardzacza.

Mechanizm powstania spoiny klejowej zależy od rodzaju zastosowanego kleju.

Utwardzanie jest procesem powstawania wytrzymałej spoiny klejowej. Zachodzi wskutek sieciowania żywicy w wyniku działania utwardzacza, katalizatora lub podwyższonej temperatury. Przebieg procesu utwardzania zależy od rodzaju kleju, z tego względu wyróżnia się kleje:

- utwardzane w wyniku reakcji anaerobowej,
- utwardzane w wyniku reakcji naświetlania promieniami UV,
- utwardzane w wyniku reakcji anionowej,
- utwardzanie poprzez dodanie aktywatorów,
- utwardzane wilgocią,
- utwardzane na gorąco.

Z tego powodu również rozróżnia się utwardzanie jednostopniowe, dwustopniowe oraz trzystopniowe.

Parametrami technologicznymi utwardzania spoiny klejowej są: omówiony powyżej nacisk (ciśnienie utwardzania), temperatura utwardzania oraz czas utwardzania.

Wartość temperatury utwardzania decyduje o tym, czy proces przebiega na zimno (w temperaturze otoczenia $< 30^{\circ}\text{C}$), na ciepło (w przedziale temperatury $31\text{--}99^{\circ}\text{C}$) czy na gorąco (w temperaturze powyżej 100°C). Maksymalną wytrzymałość połączenia klejowego można uzyskać przy optymalnej temperaturze utwardzania, charakterystycznej dla stosowanego kleju, która zazwyczaj deklarowana jest przez producenta.

Czas utwardzania związany jest ściśle z temperaturą utwardzania. W przypadku utwardzania na zimno wytrzymałość połączeń klejowych rośnie wraz z czasem utwardzania. Dla utwardzania na ciepło lub na gorąco istnieje optymalny czas utwardzania, dzięki któremu połączenia klejowe uzyskują maksymalną wytrzymałość.

Operacje uzupełniające

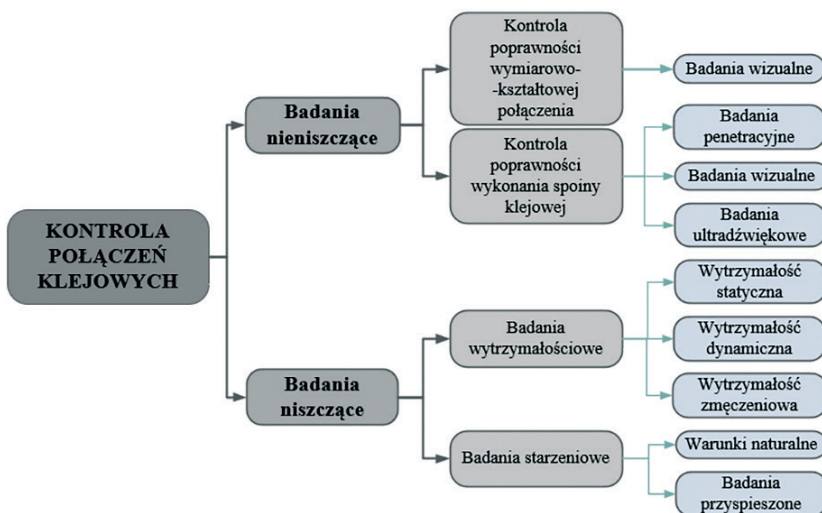
Po utwardzaniu i odpowiednim sezonowaniu połączenia w niektórych przypadkach przeprowadza się operacje uzupełniające polegające przede wszystkim na mechanicznym usunięciu wypływek kleju, lakierowaniu lub malowaniu strefy połączenia. Mają one na celu uszczelnienie połączenia i minimalizowanie wpływu środowiska, głównie wilgoci na granicy faz.

Kontrola jakości

Proces kontroli połączeń klejowych składa się z wielu operacji, podczas których sprawdzanych jest wiele czynników związanych z wykonaniem tych połączeń. Procesy klejenia zaliczane są do procesów specjalnych, dlatego też należy uwzględnić konieczność zastosowania wielu różnych metod badań w celu kontroli połączenia oraz procesu wykonania tego połączenia. Zwykle wymagana jest kompleksowa kontrola połączeń klejowych, która obejmuje:

- ocenę wizualną poprawności wymiarowo-kształtowej połączenia,
- ocenę poprawności wykonania spoiny klejowej,
- badania wytrzymałościowe,
- badania eksploatacyjne.

Proces całościowej kontroli połączeń klejowych powinien obejmować oględziny zewnętrzne, badania jakości klejenia oraz badania wytrzymałościowe, wykonane na próbkach świadkach. Badania te są realizowane przy użyciu badań metodą niszczącą i nieniszczącą, których podział przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Metody kontroli połączeń klejowych

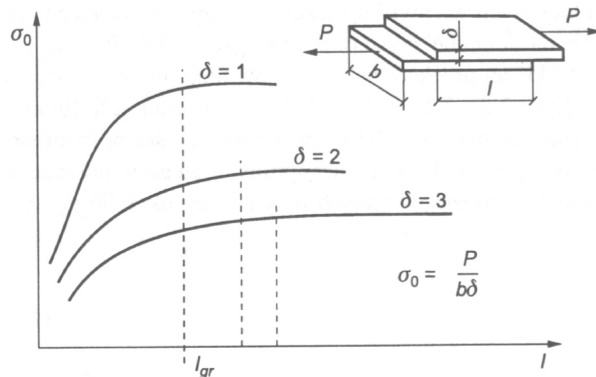
W zależności od zastosowanej metody stosowane są różne przyrządy oraz urządzenia. Zwykle każde badanie połączenia klejowego rozpoczyna się od metody wizualnej. W trakcie tego badania sprawdza się m.in. równomierność wycieków kleju na krawędzi połączenia czy barwę zestalonego kleju.

3.2. Wpływ czynników konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych

Na wytrzymałość połączeń klejowych ma wpływ wiele czynników konstrukcyjnych [5, 12]. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: długość zakładki (l), grubość klejonych elementów (δ), grubość spoiny kleju (δ_k), sztywność kleju w stanie utwardzonym (G_k), sztywność materiałów łączonych (E_m).

Długość zakładki

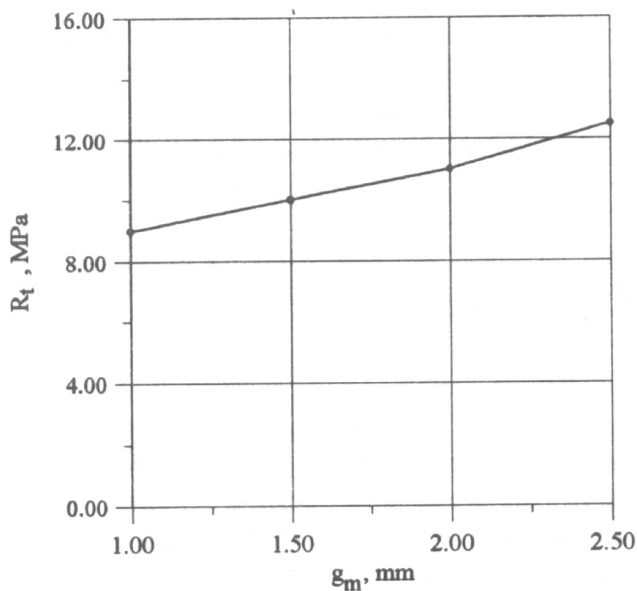
Zwiększenie długości zakładki powyżej pewnej wartości granicznej jest niecelowe. Nie skutkuje to bowiem wzrostem wytrzymałości połączenia klejowego (rys. 3.7) [7, 12]. Analizując wpływ długości zakładki na wytrzymałość połączenia, stwierdzono, że cechą charakterystyczną zakładkowych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie jest to, że ich wytrzymałość nie jest proporcjonalna do długości zakładki (tym samym do pola powierzchni spoiny).



Rys. 3.7. Zależność wytrzymałości zakładkowego połączenia klejowego obciążonego na ścinanie od długości zakładki i grubości elementów klejonych [7]

Grubość klejonych elementów

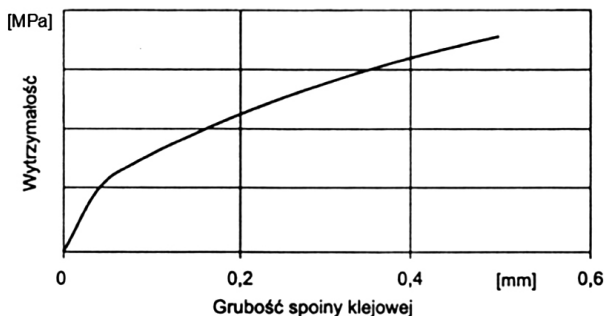
Z wyników badań prezentowanych w pracy [12] wynika, że wraz ze wzrostem grubości klejonych elementów wzrasta wytrzymałość połączenia. Jest to związane ze zmianą rozkładu naprężeń w spoinie połączenia. Przykładowy przebieg zmian wytrzymałości połączenia klejowego w funkcji grubości łączonych elementów przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8. Wpływ grubości łączonych elementów δ (mm) na wytrzymałość na ścinanie R_t , połączenia wykonanego z PA6, klej E5/Z-1/ 10:1 [12]

Grubość spoiny klejowej

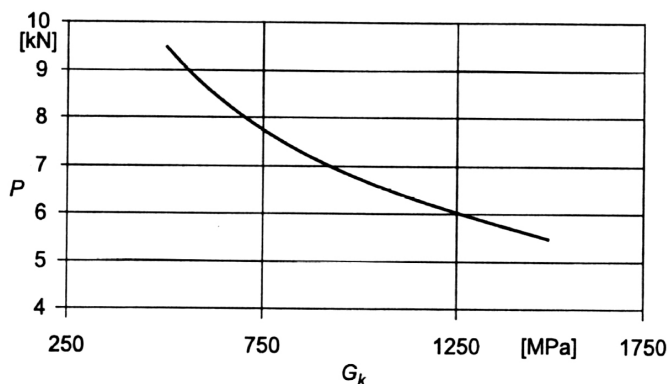
Wytrzymałość połączeń klejowych zależy także od grubości warstwy kleju. Grubość spoiny występuje w zależnościach określających wytrzymałość na ścinanie, oddzieranie, zginanie (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Charakter zależności wytrzymałości na ścinanie lub oddzieranie połączenia klejowego od grubości spoiny, przy założeniu niezależności naprężeń niszczących od jej grubości [7]

Sztywność kleju w stanie utwardzonym

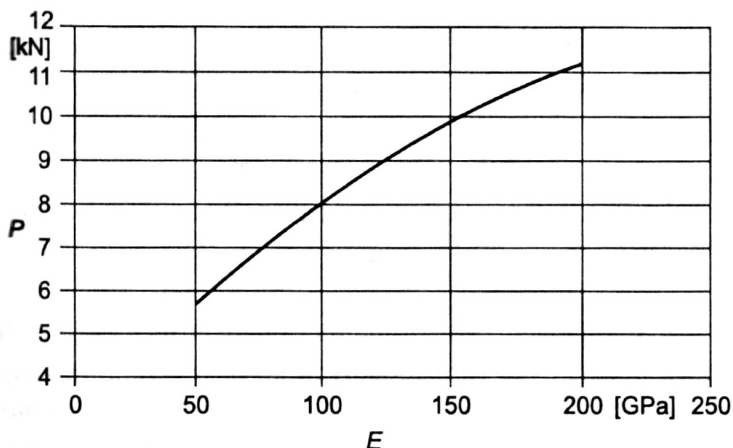
Współczynnik sprężystości poprzecznej G_k charakteryzuje sztywność kleju w stanie utwardzonym. Na podstawie informacji zawartych w pracach [7, 12] można stwierdzić, że wytrzymałość jest funkcją dwóch charakterystycznych dla kleju wielkości: naprężeń niszczących (stycznych lub normalnych) i współczynnika sprężystości (poprzecznej G_k lub wzdłużnej E_k). Z prezentowanych wyników badań można wnioskować, że wraz ze zwiększaniem się naprężeń niszczących kleju i zmniejszaniem się jego współczynnika sprężystości wytrzymałość połączeń klejowych zwiększa się (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Zależność wytrzymałości połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości postaciowej kleju [14]

Sztywność materiałów łączonych

Wyniki badań eksperymentalnych prezentowanych w pracy [12] wskazują, że połączenia klejowe blach posiadających większy moduł sprężystości przenoszą większe obciążenia w porównaniu z połączeniami klejowymi blach o mniejszym module (rys. 3.11).



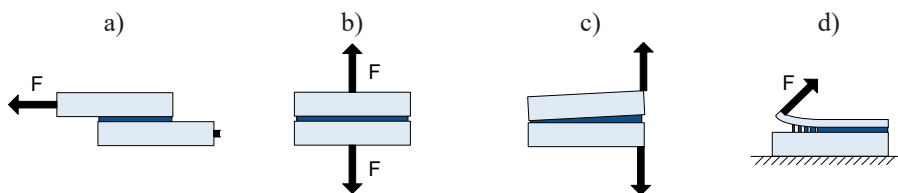
Rys. 3.11. Zależność wytrzymałości połączenia zakładkowego obciążonego na ścinanie od wartości modułu sprężystości elementów klejonych [12]

3.3. Typy połączeń klejowych

Jeden ze sposobów klasyfikacji połączeń klejowych podawanych w literaturze opiera się na ich geometrycznej konstrukcji. Wyróżnia się: połączenia współosiowe – czopowe: walcowe i stożkowe oraz połączenia nieczopowe – płaskie (czołowe lub zakładkowe) i kątowe (teowe i narożne). Bardziej zasadnym wydaje się jednak podejście, w którym kryterium podziału będą nie tylko cechy konstrukcyjne połączenia, ale również sposób obciążenia połączenia klejowego. W zależności od kierunku działania i miejsca przyłożenia sił oddziałujących na połączenie wyróżnia się następujące podstawowe rodzaje pracy połączenia:

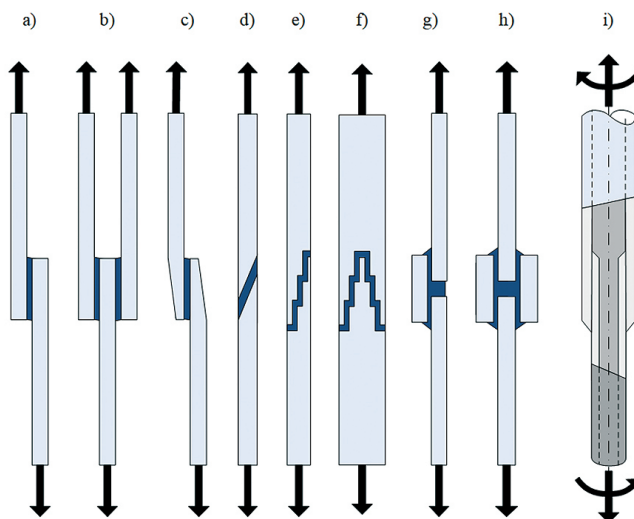
- ścianianie (połączenia zakładkowe – obciążane równoległe do zakładki, rurowe – skręcane),
- odrywanie/ściskanie (np. próbki sklejące doczołowo, obciążane osiowo),
- rozrywanie (np. połączenia doczołowe obciążane mimośrodowo),
- oddzieranie (długie połączenia zakładkowe lub powierzchniowe obciążane prostopadłe do zakładki i/lub na skraju powierzchni).

Wymienione wyżej sposoby obciążenia i pracy połączeń klejowych przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.12. Podstawowe przypadki obciążeń połączeń klejowych [8]

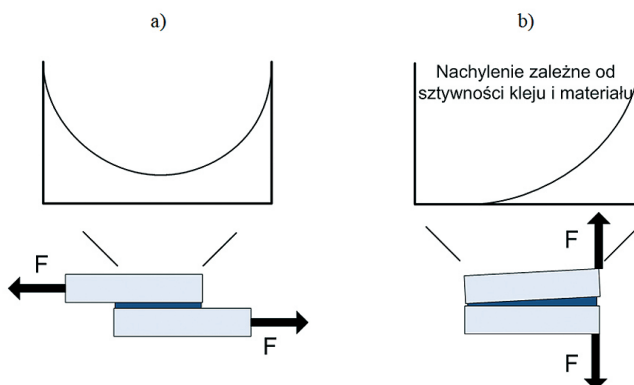
Ścinanie połączenia klejowego definiowane jest jako oddziaływanie sił w płaszczyźnie kleju w celu rozdelenia sklejonych powierzchni. Typowym połączeniem obciążonym na ścinanie jest zakładkowe połączenie dwóch płaskich elementów. Poza najprostszym przypadkiem połączenia zakładkowego stosuje się różne konstrukcyjne sposoby umożliwiające zwiększanie nośności takiego połączenia. Na rysunku 3.13 przedstawiono typowe rozwiązania konstrukcyjne połączeń zakładkowych. Poza wyżej wymienionymi wyróżnia się ponadto połączenia z zakładką odgiętą, połączenie z zakładką obustronną symetryczną i wiele innych.



Rys. 3.13. Rodzaje połączeń: a) połączenie zakładkowe, b) połączenie z podwójną zakładką symetryczną, c) połączenie z zakładką zukosowaną, d) połączenie czołowe skośne, e) połączenie stopniowe, f) połączenie stopniowe symetryczne, g) połączenie z nakładką pojedynczą, h) połączenie z podwójną nakładką, i) połączenie rurowe [2]

Zaleca się konstruowanie połączeń klejowych tak, aby jeśli tylko to możliwe, przenosiły naprężenia ścinające. Połączenia klejowe obciążone na ścinanie pracują całą długością (do długości granicznej) sklejonej powierzchni, zapewniając optymalne wa-

runki jego pracy. Na rysunku 3.14 przedstawiono dla porównania rozkład naprężeń w połączeniu zakładkowym ścinanym i zakładkowym rozrywającym.



Rys. 3.14. Rozkład naprężeń w: a) połączeniu zakładkowym badanym na ścinanie, b) połączeniu badanym na rozrywanie lub oddzieranie [13]

W przypadku połączenia zakładkowego rozkład ma charakter paraboliczny, symetryczny, z maksymalnymi naprężeniami na obydwu końcach zakładki. Środkowy fragment zakładki przenosi najmniejsze obciążenia. W pracach [3, 7] przedstawiono szczegółową analizę wpływu długości zakładki na wytrzymałość połączenia, na podstawie której zaobserwowano, że zwiększenie długości zakładki jest jednym ze sposobów na zwiększenie nośności połączeń. Wyznaczano również graniczną długość zakładki, powyżej której nie jest zauważalna poprawa parametrów wytrzymałościowych połączenia:

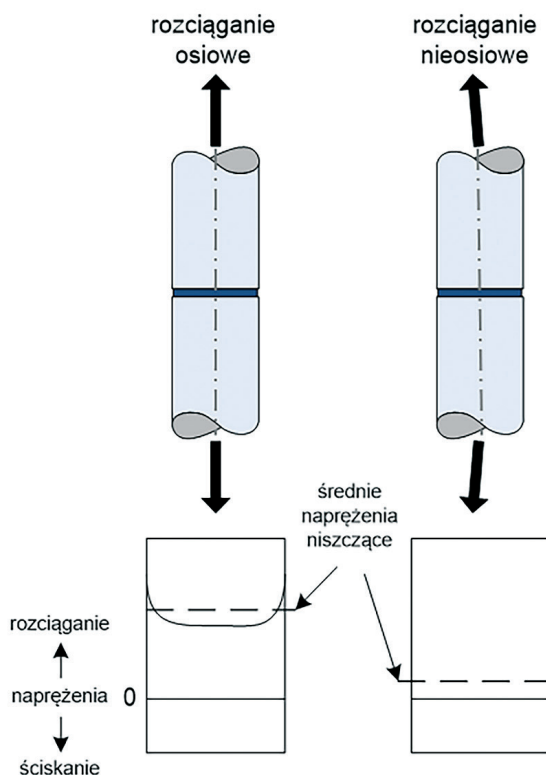
$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{E \cdot \delta \cdot \delta_k}{2G_k}} \quad (3.4)$$

gdzie:

- E – moduł Younga klejonych elementów,
- δ – grubość klejonych elementów,
- δ_k – grubość warstwy kleju,
- G_k – moduł Kirchhoffa kleju.

Innym sposobem obciążenia połączenia jest działanie na nie siłami rozciągającymi lub ściskającymi, które wywołują naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni klejonych. Taki przypadek będzie występował, gdy siły działające na połączenie klejowe będą przyłożone prostopadłe do powierzchni klejonych i będą działały na połączenie równomiernie i bez odchyień. Najmniejsze przesunięcie punktu przyłożenia lub pochylenie kierunku działania siły powoduje powstanie naprężeń zmieniających

charakter obciążenia – np. na odłupywanie [7]. Pojawienie się dodatkowego momentu zginającego może skutkować zdecydowanie większymi naprężeniami w warstwie kleju, co w rezultacie może prowadzić do szybkiego uszkodzenia połączenia (rys. 3.15). Grupę tych połączeń reprezentować może osiowe połączenie doczołowe dwóch wałków lub tulei. W związku z koniecznością zachowania prostokątności kierunku sił rozrywających w stosunku do klejonej powierzchni istotnym elementem, decydującym o wytrzymałości takiego połączenia, jest zachowanie dokładności pozycjonowania klejonych elementów na etapie ich łączenia.



Rys. 3.15. Przypadek nieosiowości obciążenia doczołowego połączenia cylindrycznego [13]

3.4. Rodzaje klejów konstrukcyjnych

Różnorodność kompozycji klejowych dostępnych na rynku wymusza na konstruktorach znajomość ich podstawowych grup. Związane jest to z często odmiennymi technologiami aplikacji i utwardzania oraz różnymi właściwościami wytrzymałościowymi wykonanego połączenia i determinuje możliwość wykorzystania danego kleju w konkretnej aplikacji. Istnieje kilka kryteriów klasyfikacji materiałów klejo-

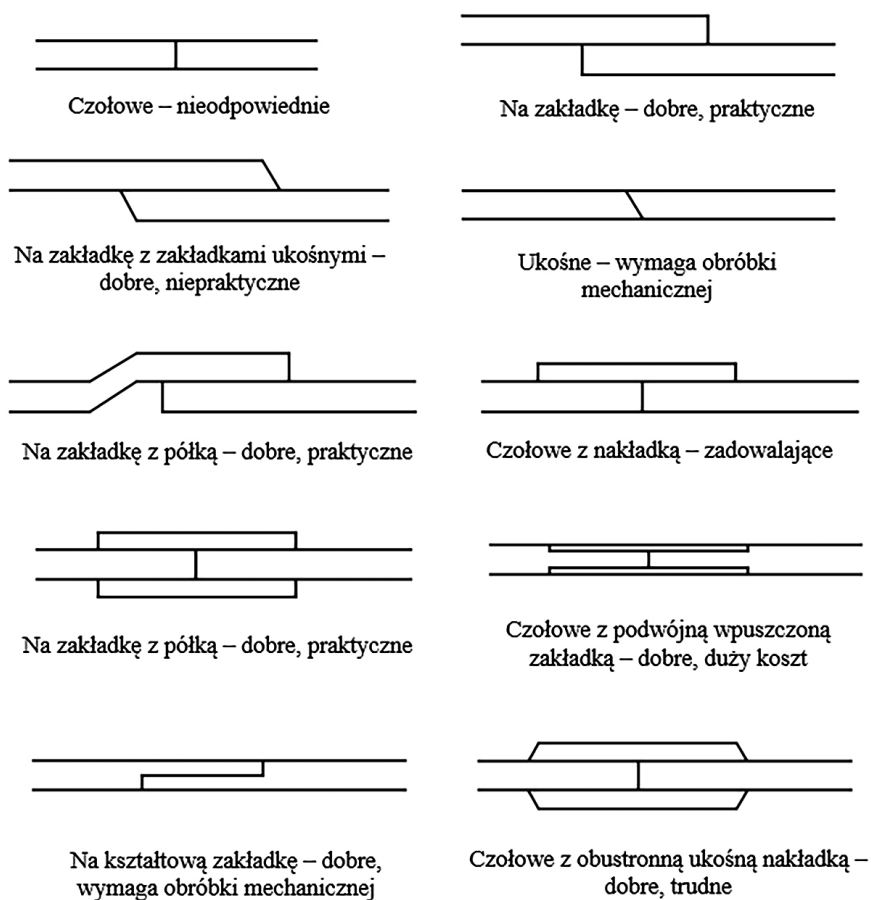
wych. Są to m.in.: postać kleju (bezpłynna, dwuskładnikowa lub jednoskładnikowa pasta lub płyn, kleje rozpuszczalnikowe, kleje w postaci stałej – np. taśmy samoprzylepne), funkcja (strukturalne, niestrukturalne), skład chemiczny czy całkowity koszt (klejów, narzędzi, przeprowadzenia wymaganych procesów). Jednym z kryteriów podziału spoiw klejowych, związanym z ich składem chemicznym, jest sposób utwardzania kleju na etapie konstituowania połączenia. Poniżej przedstawiono i omówiono kilka najważniejszych grup klejów znajdujących największe zastosowanie w inżynierii montażu.

1. Kleje można podzielić na [13]:
 - a. kleje utwardzane na skutek reakcji chemicznej;
 - b. kleje dwuskładnikowe,
 - c. kleje jednoskładnikowe aktywowane katalizatorem lub utwardzaczem,
 - d. kleje utwardzane przy obecności wilgoci,
 - e. kleje aktywowane promieniowaniem UV,
 - f. kleje katalizowane przez podłoże,
 - g. kleje w stanie stałym (taśmy, filmy, proszki itp.);
2. kleje utwardzane przez odparowanie rozpuszczalnika:
 - a. kleje kontaktowe,
 - b. kleje utwardzane pod wpływem nacisku,
 - c. kleje reaktywne,
 - d. kleje na bazie żywic;
3. kleje utwardzane przez stygnięcie kleju roztopionego (klejenie na gorąco).

W rzeczywistości okazuje się, że kleje często nie mogą być jednoznacznie przyporządkowane do poszczególnych grup. Istnieją kompozycje oparte o tę samą bazę, np. kleje epoksydowe, które mogą być utwardzane różnymi metodami: na skutek złączenia rozdzielnych składników (żywicy i utwardzacza) lub poprzez utwardzanie kompozycji jednoskładnikowej z wykorzystaniem ciepła.

3.5. Projektowanie i wytrzymałość połączeń klejowych

Połączenie klejowe stanowi swoisty rodzaj nieciągłości konstrukcji. Podczas projektowania połączeń adhezyjnych dużą uwagę należy zwrócić na kształt połączenia klejowego (rys. 3.16). Zależy on od następujących czynników: struktury klejonego zespołu lub całej konstrukcji, składu i rodzaju stopu, z którego wykonane są przyłącza, wymagań dotyczących warunków pracy konstrukcji, przyjętego procesu klejenia, wybranego oprzyrządowania oraz kosztów produkcji.



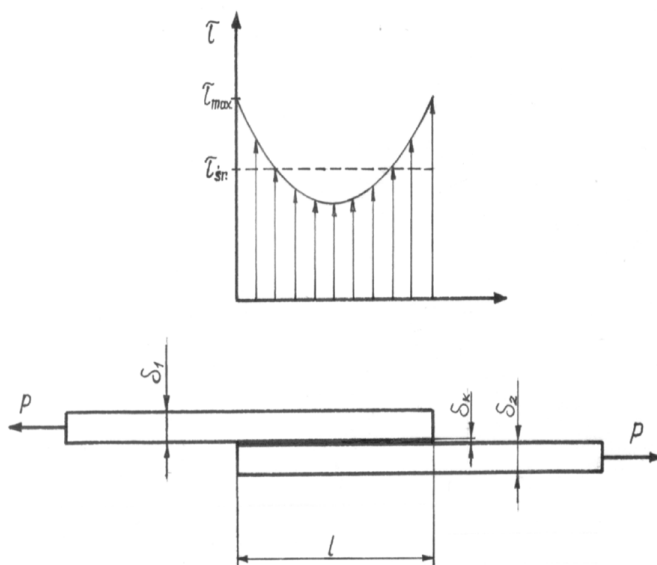
Rys. 3.16. Typowe połączenia klejowe

Dla połączenia zakładkowego, którego schemat obciążenia przedstawiono na rysunku 3.17, podczas wykonywania obliczeń jego wytrzymałości stosuje się zależność:

$$\tau = \frac{P}{F \cdot \beta} \leq k_t = \frac{R_t}{X_R} \quad (3.5)$$

gdzie:

- τ – naprężenie styczne,
- P – siła obciążająca połączenie,
- F – pole powierzchni sklejenia,
- β – współczynnik spiętrzenia naprężeń,
- k_t – dopuszczalne naprężenia na ścinanie,
- R_t – wytrzymałość połączenia,
- X_R – współczynnik bezpieczeństwa.



Rys. 3.17. Połączenie zakładkowe ze schematem jego obciążenia

Wartość współczynnika śpiętrzenia naprężeń β zależy od:

- modułu sprężystości postaciowej kleju,
- długości i szerokości zakładki,
- grubości łączonych elementów,
- modułu sprężystości wzdłużnej łączonych elementów,
- grubości warstwy kleju.

3.6. Wykonanie ćwiczenia

3.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z technologią klejenia w produkcji maszyn, praktyczne wykonanie typowych połączeń adhezyjnych zakładkowych oraz sprawdzenie ich wytrzymałości.

3.6.2. Program realizacji ćwiczenia

W ramach zajęć należy wykonać następujące działania:

- analiza właściwości materiałów przygotowanych do klejenia;
- należy przeprowadzić analizę właściwości materiałów z uwzględnieniem czynników istotnych w procesie klejenia,
- opracowanie technologii klejenia;

- na podstawie przeprowadzonej analizy właściwości materiałów, które mają być łączone, należy opracować technologię klejenia dla zdefiniowanego rodzaju połączenia,
- przygotowanie powierzchni materiałów sklejaných;
- należy przygotować powierzchnię łączonych materiałów zgodnie z opracowaną technologią,
- dobór i przygotowanie kleju;
- należy spośród dostępnych środków adhezyjnych wybrać odpowiedni klej do przeprowadzenia łączenia według opracowanej technologii,
- określenie warunków geometrycznych połączenia klejowego;
- należy określić optymalne warunki geometryczne połączenia klejowego. W tym celu należy obliczyć graniczną długość zakładki, korzystając ze wzoru (3.4) lub z zależności wg ASTM D1002 – 10:

$$L = \frac{F_{ty} \cdot \delta}{\tau} \quad (3.6)$$

gdzie:

L – długość zakładki [mm],

F_{ty} – granica plastyczności klejonego materiału [MPa],

δ – grubość klejonych elementów [mm],

τ – 150% średniej wytrzymałości na ścinanie spoiny klejowej [MPa].

- przeprowadzenie procesu montażu;
należy przeprowadzić proces łączenia przy zachowaniu przyjętych parametrów geometrycznych połączenia oraz warunków konstituowania połączenia klejowego,
- przeprowadzenie badań wytrzymałości połączenia;
należy zaplanować i przeprowadzić badania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. Uzyskane wyniki należy poddać analizie statystycznej.

3.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. ASTM Standard D2651: *Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding*.
2. Budynas R., Nisbett K.: *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Eighth Edition red., McGraw Hill, 2006.
3. Czapla A., Kłonica M.: *Analiza granicznej długości zakładki w połączeniach klejowych jednozakładkowych*, [w:] *Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn: wybrane zagadnienia problemowe*, red. T. Jachowicz, M. Kłonica i A. Rudawska, Lublin 2013, s. 47–60.
4. Czaplicki J. i in.: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*. WKŁ, Warszawa 1987.
5. Domińczuk J., Kuczmaszewski J.: *Wytrzymałość połączeń klejowych wybranych materiałów konstrukcyjnych*. II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji. Białystok 2003, s. 73–76.
6. Domińczuk J.: *Zmiany właściwości adhezyjnych stali węglowych po wybranych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej*, [w:] *Postępy w technice wytwarzania maszyn „Postępy 2001”*. IV Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Kraków 2001, s. 25–32.
7. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. WNT, Warszawa 2002.
8. Groover M. P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems*, Fourth Edition red., John Wiley & Sons, Inc., 2010.
9. Kuczmaszewski J., Domińczuk J., Rudawska A.: *Ocena właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej stopów aluminium*. „Eksploatacja i Niezawodność” 2001, 1(8), s. 9–17.
10. Kuczmaszewski J., Domińczuk J.: *Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej stali konstrukcyjnych*. „Przegląd Mechaniczny” 2001, 3, s. 5–8.
11. Kuczmaszewski J.: *Fundamentals of Metal-Metal Adhesive Joint Design*. Lublin University of Technology, Lublin 2004.
12. Kuczmaszewski J.: *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. WU Politechnika Lubelska, Lublin 1995.
13. Petrie E. M.: *Handbook of Adhesives & Sealants*. Wydanie pierwsze red., McGraw Hill Professional, 1999.
14. Rudawska A.: *Przygotowanie powierzchni do klejenia wybranych materiałów konstrukcyjnych*. WU Politechnika Lubelska, Lublin 2017.
15. Żenkiewicz M.: *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*. WNT, Warszawa 2000.

4. Montaż łożysk tocznych

Połączeniem łożyskowym nazywa się osadzanie czopów lub osi wałów w gniazdach łożysk, tj. w takich elementach, które je podtrzymują i służą do ograniczenia przemieszczeń promieniowych lub osiowych [1].

Aby w pełni wykorzystać nośność łożyska, jego pierścienie lub podkładki bieżni łożysk wzdłużnych muszą być podparte na ich całym obwodzie i wzdłuż całej szerokości bieżni. Podparcie to musi być niezawodne i może być zapewnione za pomocą walcowych i stożkowych powierzchni osadzenia lub w przypadku podkładek – za pomocą płaskich powierzchni podparcia. Oznacza to, że powierzchnie te muszą być wykonane z odpowiednią dokładnością i nie mogą być poprzerywane przez rowki, otwory i inne nierówności. Ponadto pierścienie muszą być niezawodnie zabezpieczone przed obrotem pod działaniem obciążenia. Nieodpowiednio i niewłaściwie osadzone pierścienie zwykle powodują uszkodzenie łożysk i współpracujących elementów.

Zadowalające promieniowe osadzenie łożysk i odpowiednie podparcie można zazwyczaj uzyskać tylko przez odpowiednio ciasne pasowanie pierścieni. Jednak, gdy wymaga się łatwej zabudowy i demontażu, a przy łożysku swobodnym przesuwalności osiowej, nie przewiduje się stosowania pasowania ciasnego.

4.1. Warunki techniczne montażu łożysk tocznych

Przy doborze pasowania dla łożyska tocznego należy uwzględnić następujące wytyczne ogólne:

- Sposób obciążenia

Przypadek obciążenia charakteryzują ruchy pierścieni łożysk w stosunku do kierunku obciążenia działającego na łożysko. Występuje, gdy pierścień łożyska obraca się, a obciążenie jest nieruchome lub gdy pierścień jest nieruchomy, a obciążenie się obraca. Takie obciążenie nazywane jest „obciążeniem wirującym”. Zauważyć je można, gdy obciążenie o dużej wartości nie wiruje, lecz wykonuje ruch wahadłowy. Jeżeli pierścień łożyska jest nieruchomy i obciążenie jest nieruchome, lub gdy pierścień i obciążenie wirują z taką samą prędkością, przez co obciążenie jest zawsze skierowane na ten sam punkt bieżni, obciążenie takie jest określane jako „obciążenie miejscowe”. Zmienne obciążenie zewnętrzne, obciążenie udarowe, drgania lub siły pochodzące od niewyważenia obracających się elementów, powodujące zmiany kierunku obciążenia, które nie mogą być dokładnie oszacowane, są klasyfikowane pod nazwą „kierunek obciążenia nieokreślony”.

Pod działaniem obciążenia wirującego pierścień łożyska będzie obracał się na wale lub w oprawie, jeżeli będzie luźno pasowany. Wystąpią wtedy uszkodzenia zwane korozją cierną. Aby temu przeciwdziałać, należy stosować pasowanie ciasne. Przy obciążeniu miejscowym w zasadzie nie występuje pełzanie pierścienia i ciasne pasowanie

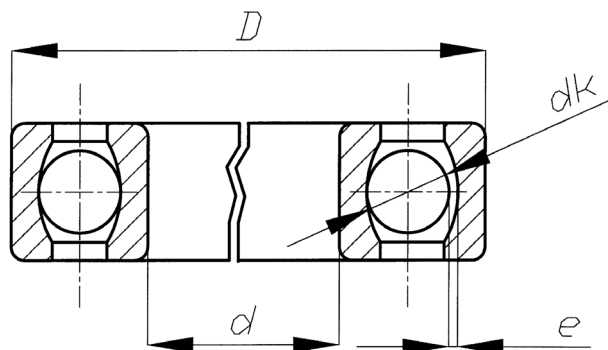
nie jest konieczne. Przy nieokreślonym kierunku obciążenia, a szczególnie wtedy, gdy jest ono duże, konieczne jest ciasne pasowanie obu pierścieni.

- Wartość i charakter obciążenia

Pewność osadzenia pierścienia wewnętrznego słabnie wraz ze wzrostem działającego na łożysko obciążenia, ponieważ pod jego wpływem pierścienią się rozszerza. W przypadku występowania obciążenia wirującego może nawet nastąpić obracanie się pierścienia na wale. Aby tego uniknąć, należy dobierać rodzaj pasowania w zależności od obciążenia, przy czym im większa jego wartość, tym powinno być ciaśniejsze. Analogicznie należy postępować przy obciążeniach typu udarowego.

- Luz wewnętrzny

Pod pojęciem luzu wewnętrznego łożyska należy rozumieć odległość, na jaką można przesunąć jeden z pierścieni w stosunku do drugiego, bez wywierania nacisku w kierunku promieniowym (rys. 4.1) (luz promieniowy) lub w kierunku osiowym (luz osiowy), z jednego skrajnego położenia w drugie. Luz niezabudowanego łożyska jest większy niż luz roboczy, ponieważ na skutek wcisków wynikających z przyjętego pasowania i różnego wydłużenia cieplnego łożyska i elementów współpracujących pierścienie łożyska w temperaturze roboczej ulegają rozszerzeniu lub zacieśnieniu.



Rys. 4.1. Luz w łożysku kulkowym

Do zapewnienia prawidłowej pracy łożyska zasadnicze znaczenie ma luz promieniowy. Jako ogólną zasadę można przyjąć założenie, że w łożyskach kulkowych roboczy luz promieniowy powinien być bliski zera lub łożysko powinno wykazywać nieznaczne napięcie wstępne. W łożyskach walcowych lub baryłkowych w czasie pracy zawsze powinien być zachowany niewielki luz roboczy. Ta sama zasada odnosi się do łożysk stożkowych. Nie dotyczy to układów łożyskowania o wymaganej większej sztywności, gdzie celowo wprowadza się napięcie wstępne.

Przy ciasnym pasowaniu łożyska na wale i w oprawie następuje deformacja pierścieni (pierścień wewnętrzny powiększa swoje wymiary, a pierścień zewnętrzny je zmniejsza), w wyniku czego luz wewnętrzny łożyska ulega zmniejszeniu. Wartość luzu i stopień jego zmniejszenia zależą od rodzaju i rozmiarów łożyska. Ponieważ pewien niewielki luz w łożysku powinien być zachowany, dlatego też w tych przypadkach, kiedy jego zmniejszenie w wyniku przyjętego pasowania jest zbyt duże, konieczne jest stosowanie łożysk z luzem większym od normalnego.

W praktyce można przyjmować, że zmiany średnicy bieżni pierścieni wynoszą: dla wewnętrznego ok. 0,7 rzeczywistego wcisku przy włączaniu łożyska na wał, a dla zewnętrznego ok. 0,8 rzeczywistego wcisku przy osadzaniu łożyska w otworze kadłuba. Ogólnie przyjmuje się, że wcisk rzeczywisty jest równy 80% wcisku teoretycznego [2].

- Warunki temperaturowe

Pierścienie łożysk podczas pracy osiągają zwykle wyższą temperaturę niż części maszyn, w których są zabudowywane. Może to spowodować rozluźnienie pasowania na wale i zaciśnięcie osadzenia pierścieni zewnętrznych, co w przypadku łożysk swobodnych może uniemożliwić przesuwanie osiowe w otworze oprawy.

- Przypadek względnego ruchu pierścieni

W przypadku ruchomego wałka, w celu zabezpieczenia pierścienia wewnętrznego przed obracaniem się po powierzchni czopa, osadza się go na czopie – tym ciasniej, im większe obciążenie przenosi łożysko. Pierścień zewnętrzny pasuje się w osłonie suwliwie. W przypadku ruchomej osłony pasowanie pierścienia zewnętrznego w osłonie musi być ciasne, zaś pasowanie pierścienia wewnętrznego na czopie może być suwliwe. W przypadku niepewnym, czyli gdy zachodzi możliwość wystąpienia obu przypadków ruchu względnego, w celu zabezpieczenia pierścieni przed przemieszczaniem, obydwie pierścienie muszą być osadzone ciasno. Wówczas uzyskanie prawidłowego luzu roboczego wymaga wyboru łożyska o powiększonych luzach.

- Dokładność łożyskowania
- Rodzaj i wielkość łożyska

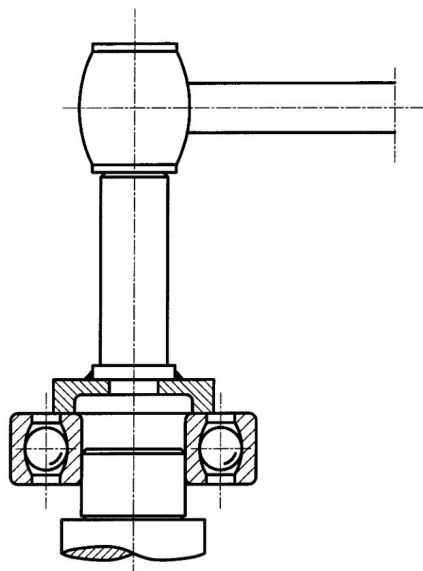
4.2. Montaż zespołu wał–łożysko, łożysko–obudowa

Znajomość techniki zabudowy oraz zachowanie czystości przy zakładaniu łożysk to podstawowe warunki, których spełnienie zapewnia prawidłową i bezawaryjną ich pracę. Zabudowa łożyska powinna być przeprowadzana w miarę możliwości w czystych i suchych pomieszczeniach, usytuowanych z dala od obrabiarek do obróbki mechanicznej i urządzeń powodujących zapylenie. Przed rozpoczęciem zabudowy wszystkie niezbędne części, narzędzia i urządzenia pomocnicze powinny być przygotowane na stanowisku pracy w kolejności, w jakiej będą używane podczas zabudowy zgodnie z dokumentacją. Wszystkie elementy łożyskowania (oprawa, wał itp.) powinny być starannie oczyszczone. Łożyska powinny pozostać w opakowaniu oryginalnym

aż do momentu zabudowy, aby nie uległy wcześniejszemu zanieczyszczeniu. Fabrycznie nowe łożyska są pokryte środkiem konserwującym [6], który zwykle nie musi być usuwany z łożyska z wyjątkiem powierzchni otworu i powierzchni zewnętrznej łożyska. Jeśli łożysko jest przeznaczone do pracy w bardzo niskich lub bardzo wysokich temperaturach i ma być smarowane smarem plastycznym, lub gdy przewidziany smar nie jest zgodny ze środkiem konserwującym, łożysko musi być przed zabudową dokładnie wymyte i wysuszone, aby pozostałości środka konserwującego nie pogorszyły właściwości zastosowanego smaru plastycznego.

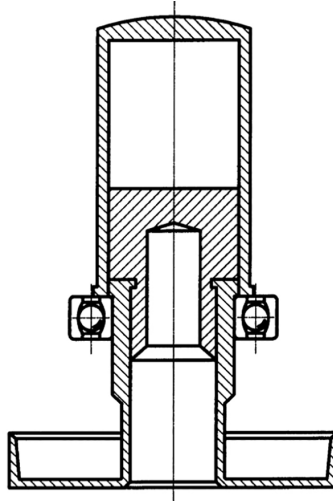
Sposób zabudowy łożyska (mechaniczny, hydrauliczny lub termiczny) zależy od rodzaju i rozmiarów łożyska. W każdym przypadku muszą być wyeliminowane uderzenia bezpośrednio na pierścieni łożyska, koszyki lub elementy toczne, aby nie uszkodzić lub nie zniszczyć łożysk. Siły przy zabudowie nie powinny być przenoszone przez elementy toczne.

W przypadku łożysk nierozłącznych na ogół montuje się najpierw ten pierścień, który ma ciaśniejsze pasowanie. Powierzchnie osadzenia łożysk na czopie wału lub w gnieździe oprawy powinny być zwilżone środkiem smarnym przed zabudową. Jeśli pasowanie łożyska nie jest zbyt ciasne, małe łożyska mogą być zakładane na czop wału lub wkładane w otwór oprawy za pomocą lekkich uderzeń młotkiem poprzez przyłożoną do pierścienia tulejkę (rys. 4.2). Aby łożysko się nie zakleszczyło, uderzenia powinny następować równomiernie na całym obwodzie.

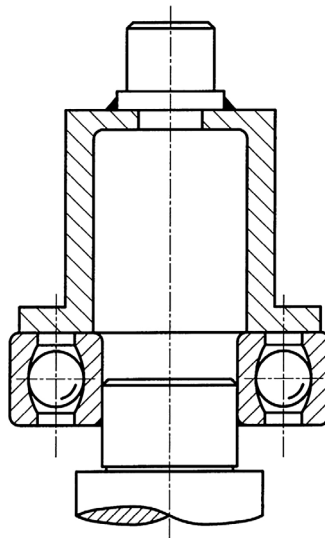


Rys. 4.2. Osadzenie łożysk na wale przy użyciu tulei

Zastąpienie tulei specjalnym trzpieniem zapewniającym centryczne rozłożenie siły nacisku na czoło pierścienia przedstawiono na rysunku 4.3. Jeśli łożysko nierozłączne musi być wciśnięte jednocześnie na czop wału i w gnieździe oprawy, zaleca się stosowanie pierścienia montażowego między łożyskiem a pobijakiem, przylegającego do powierzchni bocznej pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego (rys. 4.4). Aby zapewnić równomierne rozłożenie siły nacisku na oba pierścienie łożyska, powierzchnie pierścienia montażowego stykające się z łożyskiem muszą znajdować się w jednej płaszczyźnie.



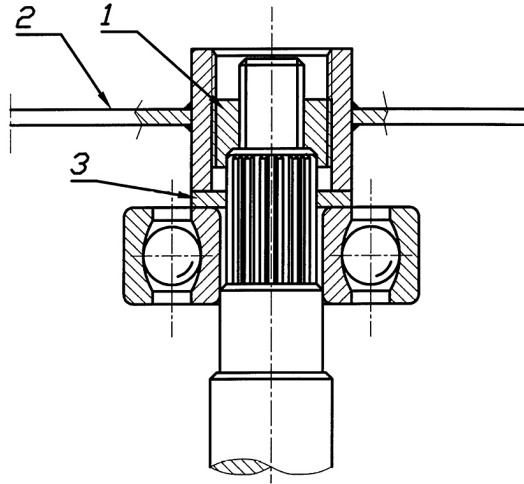
Rys. 4.3. Osadzanie łożysk przy użyciu trzpienia z centrującą końcówką



Rys. 4.4. Jednoczesne osadzanie łożysk w obudowie i na wale przy użyciu tulei z kołnierzem

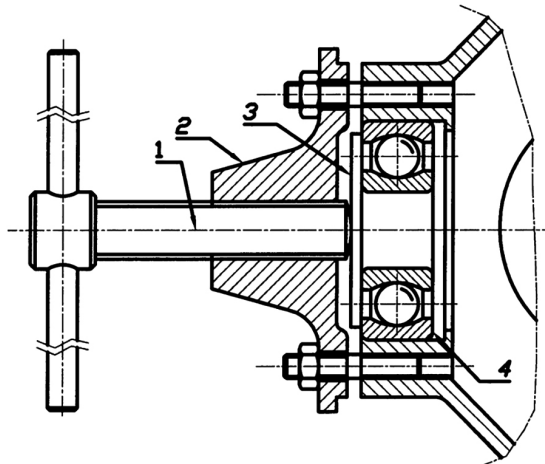
Zastosowanie pierścienia montażowego przy zakładaniu łożysk wahlowych zabezpiecza pierścień zewnętrzny przed przechyleniem i obrotem.

Do osadzania łożysk na czopie wału można także użyć gwintowanego końca wału, jako podstawy oporowej dla przyrządu (rys. 4.5). Na zewnętrznym gwincie podwójnej nakrętki 1 umieszcza się nakrętkę 2 z pokrętłem, którego obrót powoduje wtlaczanie łożyska za pośrednictwem pierścienia 3 na czop wału [3].



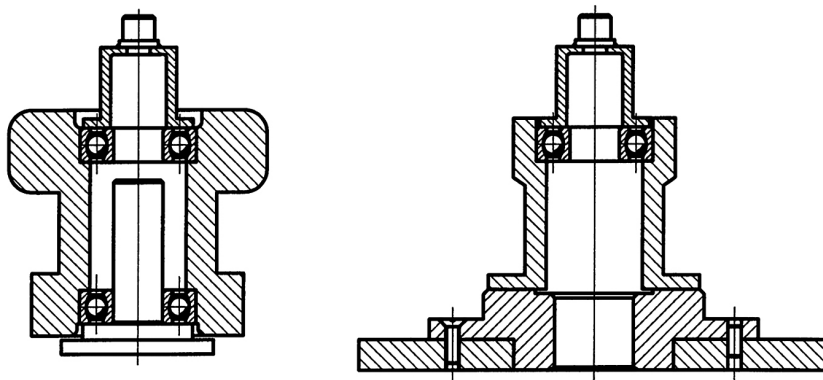
Rys. 4.5. Użycie gwintów na wale do wywołania siły potrzebnej do osadzenia łożyska tocznego

Do osadzenia łożysk możliwe jest również użycie otworów gwintowanych znajdujących się w obudowie. Wykorzystując powierzchnię gwintu, montuje się tarczę przyrządu 2 (rys. 4.6). Obrót gwintu 1 przenosi za pośrednictwem podkładki 3 nacisk na łożysko 4.



Rys. 4.6. Użycie gwintów w obudowie do montażu łożysk

Osadzanie łożyska w korpusie wykonuje się podobnie jak na wale, z tą różnicą, że w przypadku występowania dużych wcisków istnieje możliwość podgrzania strefy montażu lub oziębienia montowanego łożyska. Montaż przeprowadza się przy użyciu specjalnych opravek i przyrządów do wtłaczania, zapewniających pewne zamocowanie montowanego zespołu (rys. 4.7). Dzięki temu w dużym stopniu maleje prawdopodobieństwo powstania braków spowodowanych nieprawidłowym ustaleniem łożyska podczas wtłaczania.



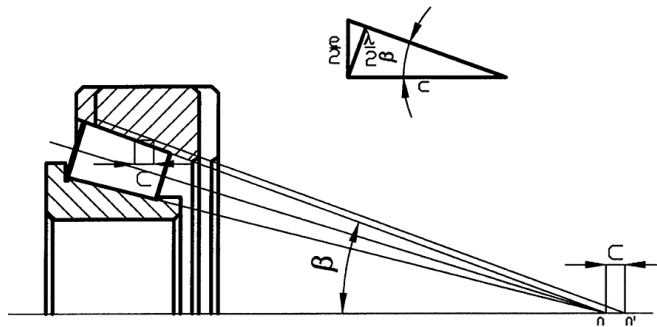
Rys. 4.7. Montaż łożysk tocznych w gnieździe korpusu przy użyciu oprzyrządowania zapewniającego prawidłowe bazowanie części

Łożyska o większych wymiarach (o średnicy powyżej 60 mm) przy ciasnym pasowaniu nie powinny być wciskane na zimno na czop wału lub w gniazdo oprawy, ponieważ wymagałyby to bardzo dużych sił [5]. W takich przypadkach zaleca się podgrzewanie pierścieni łożysk lub opraw przed zabudową.

Wymagana różnica temperatury między pierścieniem łożyska i miejscem jego osadzenia zależy od rodzaju pasowania i średnicy osadzenia. Łożyska nie powinny być podgrzewane do temperatury wyższej od 125°C, ponieważ po jej przekroczeniu może ulec zmianie struktura materiału i wystąpić trwała zmiana wymiarów. Łożyska z blaszkami ochronnymi i pierścieniami gumowymi nie powinny być podgrzewane, aby nie spowodować podgrzania smaru przed zabudową. Przy podgrzewaniu łożysk należy bezwarunkowo unikać miejscowego przegrzania. Równomierne bezpieczne podgrzewanie jest możliwe za pomocą elektrycznych urządzeń grzewczych, komór grzewczych lub kąpieli olejowych.

4.3. Zasady montażu łożysk stożkowych

Łożyska stożkowe posiadają bieżnie w pierścieniu wewnętrznym i zewnętrznym w kształcie stożka. Między bieżniami umiejscowione są stożkowe wałeczki. Wierzchołki wszystkich powierzchni stożkowych zbiegają się w jednym punkcie na osi stożka. Taka geometria układu zapewnia prawidłowe warunki względnego obracania się pierścieni łożyska przy zachowaniu efektu toczenia się wałeczków. Ze względu na swą konstrukcję łożyska stożkowe mogą przenosić zarówno obciążenia promieniowe, jak i osiowe. Zdolność łożyska do przenoszenia obciążeń osiowych w dużym stopniu zależy od kąta β (rys. 4.8), który odpowiada kątowi bieżni pierścienia zewnętrznego. Im ten kąt jest większy, tym większa jest nośność łożyska w kierunku osiowym [4].



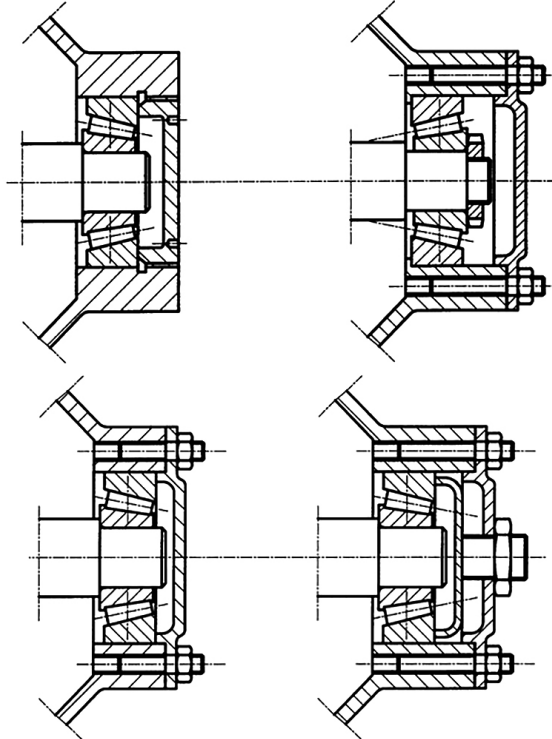
Rys. 4.8. Schemat regulowania luzu promieniowego w łożysku stożkowym

W zależności od zastosowania łożyskowanie może mieć dodatni lub ujemny luz roboczy. Dla większości zastosowań luz roboczy jest dodatni, co oznacza, że występuje w nim niewielki luz pozwalający na swobodne obracanie się elementów toczących. W niektórych przypadkach, np. w łożyskowaniach wrzecion roboczych obrabiarek, łożyskowaniach przekładni bezluzowych, łożyskowaniach zespołów wykonujących ruchy oscylacyjne, stosowany jest ujemny luz roboczy. W takim przypadku łożyska montowane są z zachowaniem napięcia wstępnego. Takie rozwiązanie powoduje zwiększenie sztywności łożyskowania i poprawienie dokładności ruchu. Napięcie wstępne realizowane np. za pomocą elementu sprężystego stosuje się w przypadku potrzeby zapewnienia bezluzowej pracy układów mało obciążonych pracujących przy dużej prędkości obrotowej.

Regulację i dobór luzu w łożyskach stożkowych przeprowadza się w odmienny sposób niż w przypadku łożysk walcowych, co wpływa na przebieg ich montażu. Promieniowy luz w łożysku stożkowym reguluje się przez poosiowe przesunięcie pierścienia zewnętrznego o wielkość c (rys. 4.8). Wartość przesunięcia promieniowego e można wyznaczyć, opierając się na zależności geometrycznej. Zależności między tym przesunięciem, luzem promieniowym e i luzem wzdłuż linii nacisku λ są następujące (4.1) [3]:

$$e = 2c \cdot \operatorname{tg} \beta, \lambda = 2c \sin \beta, \lambda = e \cos \beta \quad (4.1)$$

Montaż zespołu z łożyskiem stożkowym obejmuje oddzielne osadzenie pierścienia wewnętrznego z wałeczkami i koszyczkiem na wale oraz pierścienia zewnętrznego w korpusie. Po ustaleniu dla danego typu łożyska wartości c , potrzebnej do zapewnienia w łożysku niezbędnego luzu promieniowego, montuje się zespoły. Na rysunku 4.9 przedstawiono wybrane sposoby ustalania luzu promieniowego przez zmianę grubości zestawu podkładek regulacyjnych i pokręcanie śrubą regulacyjną lub nakrętką regulacyjną.



Rys. 4.9. Przykładowe sposoby regulacji luzu w łożyskach stożkowych

Przy regulacji luzu podkładkami regulacyjnymi, grubość podkładek dystansowych określa się na podstawie wymiarów geometrycznych gniazd montażowych i wymiarów łożyska [2].

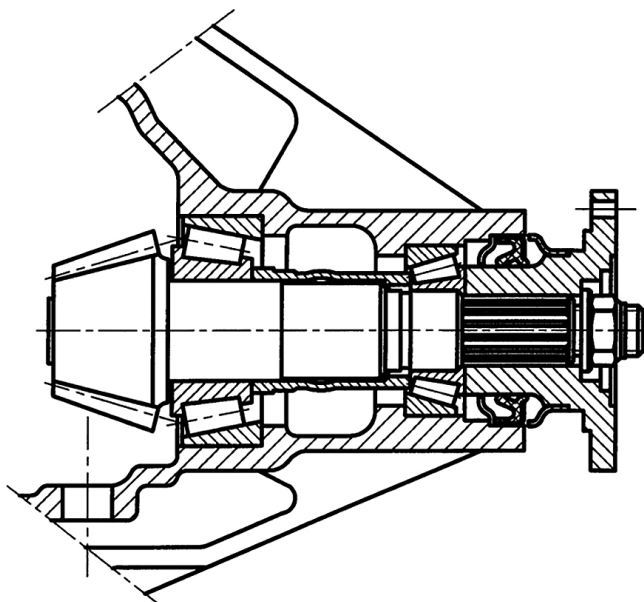
Podczas regulacji luzu za pomocą śruby lub nakrętki dokręca się je do chwili, gdy wał zacznie stawiać opór, a następnie luzuje o kąt ϕ określony wzorem (4.2):

$$\phi = \frac{c}{h} 360^\circ \quad (4.2)$$

gdzie:

h – skok gwintu.

W przypadku, gdy zespół łożyskowy powinien być zmontowany z określonym napięciem wstępnym w łożyskach, tuleję dystansową z podkładkami można zastąpić tuleją sprężystą. Przykład tak zmontowanego zespołu pokazano na rysunku 4.10, gdzie zastosowano tuleję z karbem, który powoduje powstanie odkształcenia w tulei w kierunku zmniejszenia jej długości. Napięcie wstępne w łożyskach kontroluje się podczas montażu kluczem dynamometrycznym. Wartość momentu skręcenia nakrętki określa się na podstawie wartości momentu obrotowego potrzebnego do obrócenia wału. Wartość tego momentu zależy od wymiarów łożysk i przeznaczenia montowanego zespołu.



Rys. 4.10. Zespół łożyskowy z tuleją sprężystą

4.4. Sprawdzanie poprawności osadzenia łożysk kulkowych

W ramach sprawdzania prawidłowości osadzenia łożyska na wale i w korpusie należy przeprowadzić następujące czynności:

- sprawdzenie ruchu pierścienia zewnętrznego przy osadzeniu łożyska na wał i wewnętrzny przy osadzeniu łożyska w kadłubie,
- sprawdzenie szczelności przylegania pierścienia wewnętrznego do osadzenia na czopie i zewnętrznego w otworze,
- określenie luzów promieniowych i poosiowych.

Sprawdzenie ruchu pierścieni po osadzeniu na wale lub w gnieździe ma na celu upewnienie się, czy nie nastąpiła zbyt duża redukcja luzu w łożysku. W przypadku osadzenia łożyska na czopie wału pierścień zewnętrzny powinien obracać się lekko i rów-

nomiennie. Przy osadzeniu łożyska w kadłubie należy skontrolować, czy pierścień wewnętrzny obraca się swobodnie [3].

Najprostszym sposobem określenia wartości luzu promieniowego w łożysku, po osadzeniu go na wale lub w kadłubie, jest sprawdzenie jego luzu poosiowego. Między luzem promieniowym e i poosiowym c w łożyskach istnieje następująca geometryczna zależność:

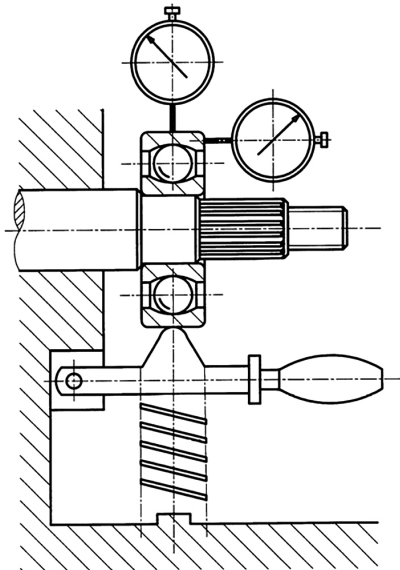
$$c = 2\sqrt{(2r - d_k)e} \quad (4.3)$$

gdzie:

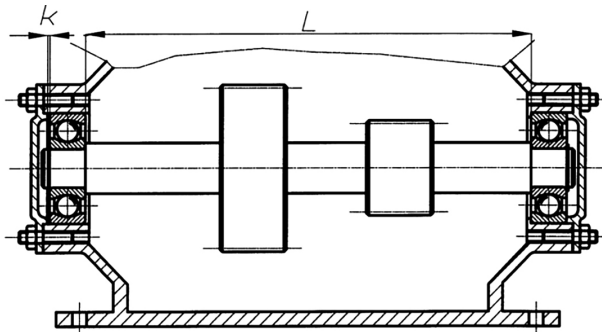
- r – promień bieżni łożyska,
- d_k – średnica kulki.

W łożyskach wartość luzu poosiowego jest znacznie większa od luzu promieniowego. Poosiowe przesunięcia zewnętrznego pierścienia w wielu łożyskach są łatwo wyczuwalne. Wykorzystuje się to często do sprawdzenia prawidłowości montażu przez poruszanie zewnętrznym pierścieniem. Przy montażu dokładnych łożysk po ich włożeniu luzu sprawdza się specjalnymi przyrządami, których zasadę działania przedstawiono na rysunku 4.11.

Na rysunku 4.12 zaprezentowano przykład konstrukcji z zastosowanym luzem osiowym k umożliwiającym przesunięcia elementów podczas pracy wału osadzonego w dwóch łożyskach tocznych.



Rys. 4.11. Schemat sprawdzania luzów w łożysku osadzonym na wale za pomocą czujników zegarowych



Rys. 4.12. Luz osiowy k umożliwiający przesunięcia elementów podczas pracy wału osadzonego w dwóch łożyskach tocznych

4.5. Wykonanie ćwiczenia

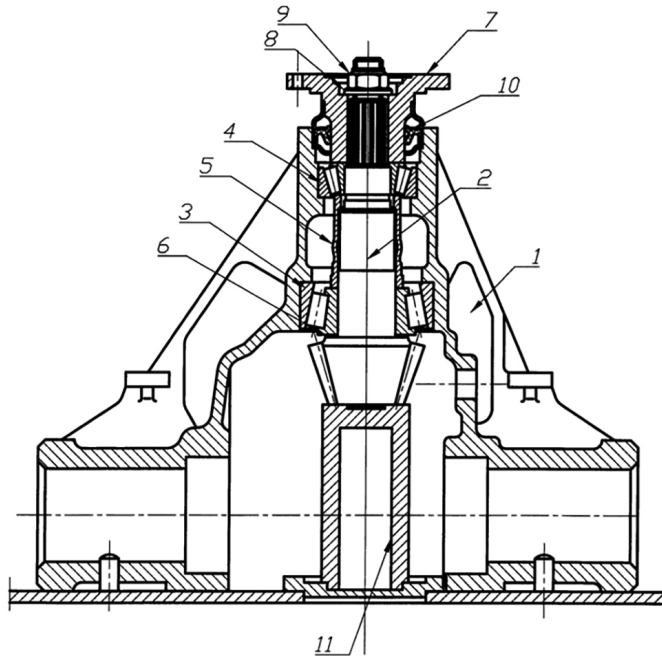
4.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z technologią montażu łożysk tocznych, praktyczne przeprowadzenie montażu i demontażu zespołu łożyskowego wraz ze sprawdzeniem poprawności wykonanych prac.

4.5.2. Program realizacji ćwiczenia

W ramach realizacji ćwiczenia należy (rys. 4.13):

- wcisnąć w obudowę przekładni głównej 1 dwa pierścienie zewnętrzne łożysk 3 i 4,
- ustawić pionowo wałek napędzający 2 na palecie 11, założyć podkładkę regulacyjną 6 i wewnętrzny pierścień łożyska 3,
- wcisnąć pierścień wewnętrzny łożyska 3 na wałek napędzający,
- nałożyć obudowę przekładni głównej na wałek napędzający,
- założyć na wałek napędzający tuleję dystansową 5 i pierścień wewnętrzny łożyska 4,
- wcisnąć pierścień wewnętrzny łożyska 4 na wałek i uszczelniacz 10 w obudowę przekładni,
- założyć i wcisnąć na wałek końcówkę kołnierзовą 7,
- założyć na wałek napędzający podkładkę 8 i nakręcić ręcznie nakrętkę 9,
- zablokować końcówkę kołnierзовą 7 i dokręcić nakrętkę momentem 176–245 Nm,
- sprawdzić moment oporowy wałka napędzającego na łożyskach stożkowych kluczem dynamometrycznym o zakresie do 5 Nm – w ustalonym ruchu obrotowym powinien się mieścić w przedziale 1,8–2,8 Nm,
- jeżeli moment obrotowy nie mieści się w wyznaczonym przedziale, należy przeprowadzić regulację,
- dokonać demontażu zespołu.



Rys. 4.13. Schemat montowanego zespołu: 1 – obudowa przekładni głównej, 2 – wałek napędzający, 3, 4 – pierścienie zewnętrzne łożysk, 5 – tuleja dystansowa, 6 – podkładka regulacyjna, 7 – końcówka kołnierzyowa, 8 – podkładka, 9 – nakrętka, 10 – uszczelniacz, 11 – paleta

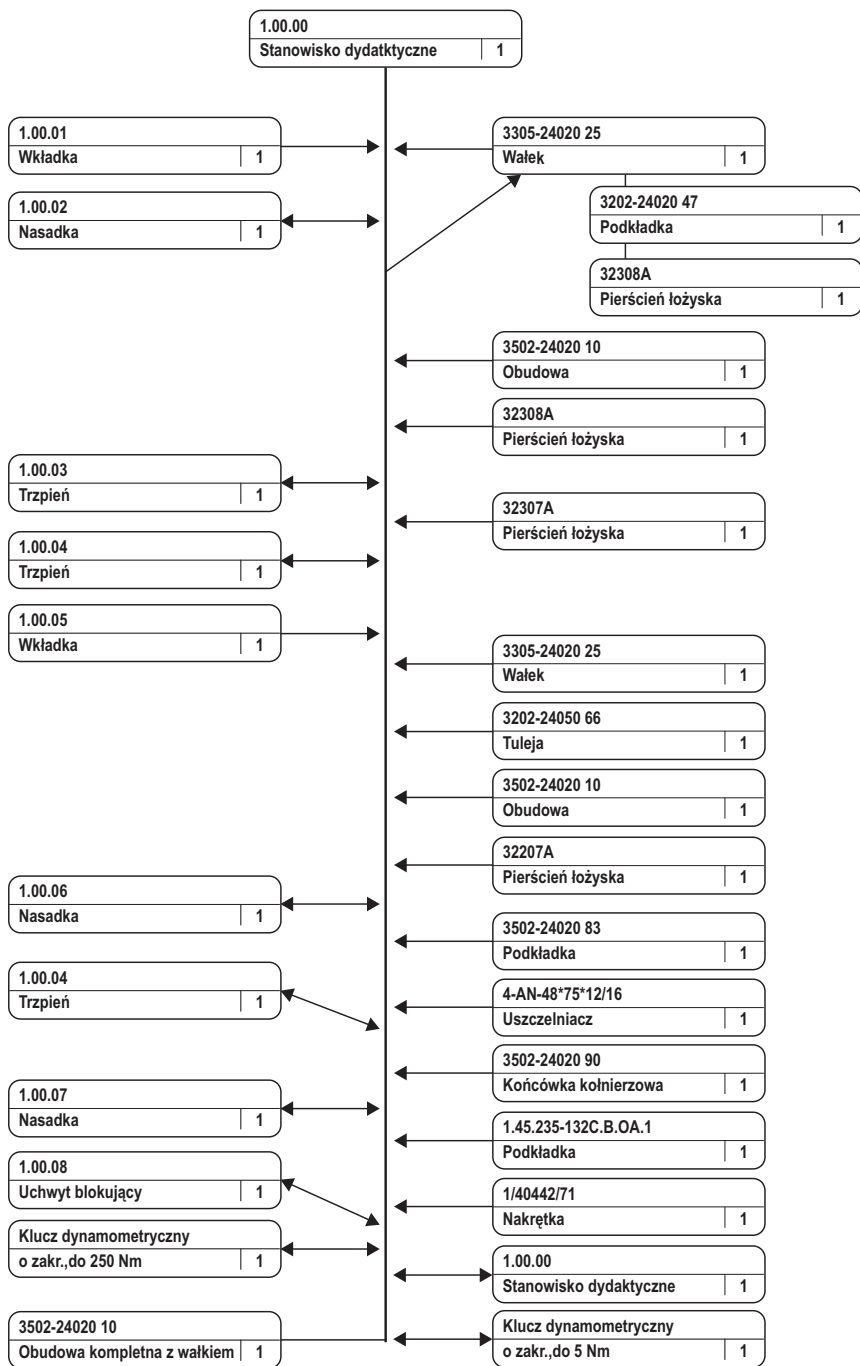
4.5.3. Szczegółowy przebieg montażu

Kolejność czynności przedstawiono w technologicznym schemacie montażu (rys. 4.14) i na rysunkach poglądowych do poszczególnych czynności (rys. 4.15–4.19) z zaznaczeniem numeracji części i wyposażenia.

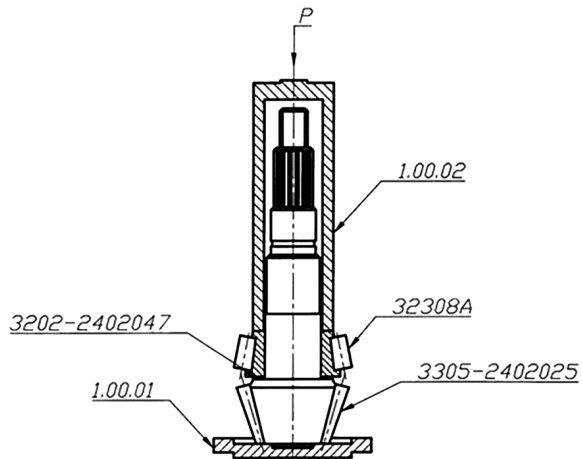
1. Założyć podkładkę dystansową nr 3202-240247 na wałek napędzający nr 3305-2402025 łożyska 32308A, ustawić na wkładce nr 1.00.01 i wcisnąć przy użyciu nasadki nr 1.00.02 (rys. 4.15).
2. Ustawić obudowy mostu na wkładce nr 1.00.01.
3. Wcisnąć pierścień zewnętrzny łożyska 32308A w obudowę przy użyciu trzpieńca nr 1.00.03.
4. Przekręcić obudowę o 180° w płaszczyźnie wzdłużnej stołu (rys. 4.16).
5. Wcisnąć pierścień zewnętrzny łożyska 33207A w obudowę przy użyciu trzpieńca nr 1.00.04.
6. Zdjąć obudowę (rys. 4.17).
7. Włożyć wkładkę 1.00.05 we wkładkę 1.00.1.
8. Ustawić wałek nr 3305-2402025 na wkładce 1.00.05, założyć na wałek tulejkę nr 3202-2402066.

9. Odchylić ramię praski w pozycję ułatwiającą założenie obudowy.
10. Nałożyć na wałek obudowę mostu nr 3502-2401010.
11. Nałożyć na wałek pierścień wewnętrzny łożyska 33207A i wcisnąć go przy użyciu nasadki nr 1.00.06 (rys. 4.18).
12. Założyć podkładkę ochronną nr 3502-2402083.
13. Włożyć uszczelniacz nr 4-AN-48*75*12/16 w obudowę i wcisnąć przy użyciu trzpienia nr 1.00.04.
14. Założyć końcówkę kołnierзовą nr 3502-2402090 na wieloklin wałka i w uszczelniacz, wcisnąć do oporu przy użyciu nasadki nr 1.00.07.
15. Założyć podkładkę nr 1.45.235-132CB.OA.1 na wałek i nakręcić nakrętkę 1/40442/71.
16. Założyć uchwyt blokujący nr 1.00.08 na wkładkę kołnierзовą i dokręcić nakrętkę kluczem dynamometrycznym, momentem 176–245 Nm (uwaga: w czasie dokręcania nakrętki zdejmować uchwyt blokujący i dokonywać obrotu wałkiem w celu prawidłowego ustalenia łożysk).
17. Zdjąć uchwyt blokujący (rys. 4.19).
18. Przeprowadzić sprawdzenie momentu oporowego wałka kluczem dynamometrycznym o zakresie do 5 Nm.

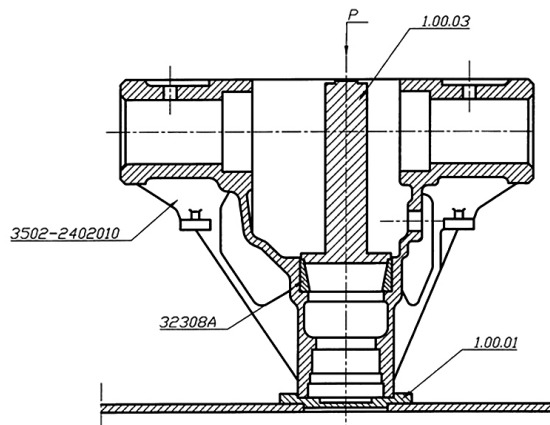
Wartość momentu oporowego powinna się mieścić w przedziale 1,8–2,8 Nm.



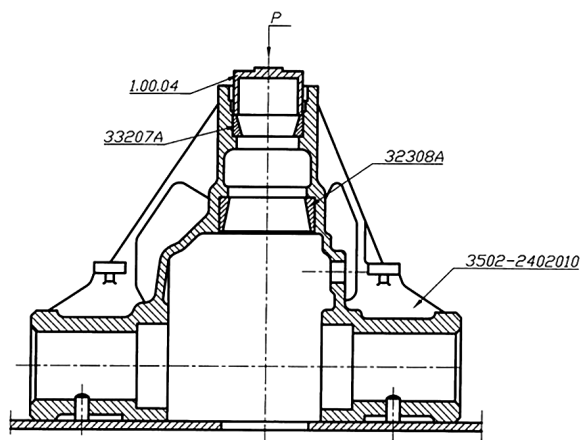
Rys. 4.14. Schemat montażu wałka napędzającego tylnego mostu



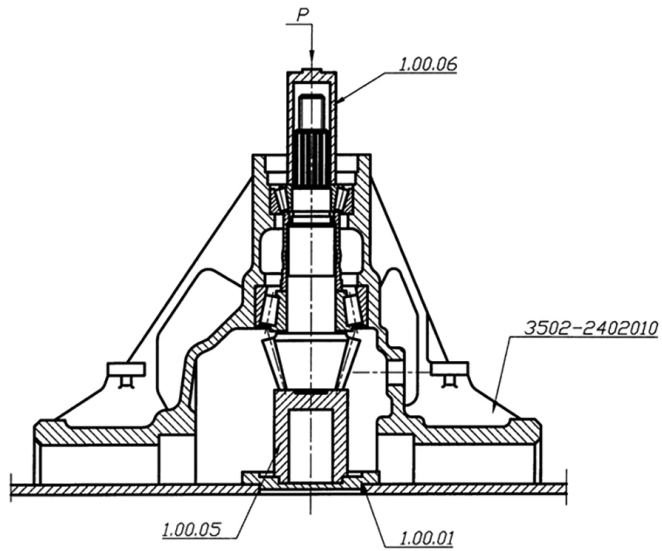
Rys. 4.15. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 1 montażu



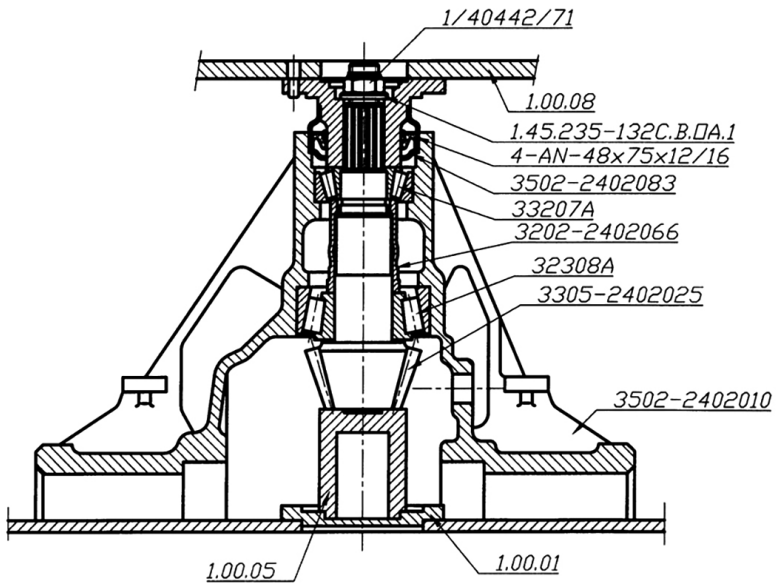
Rys. 4.16. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 2 montażu



Rys. 4.17. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 3 montażu



Rys. 4.18. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 4 montażu

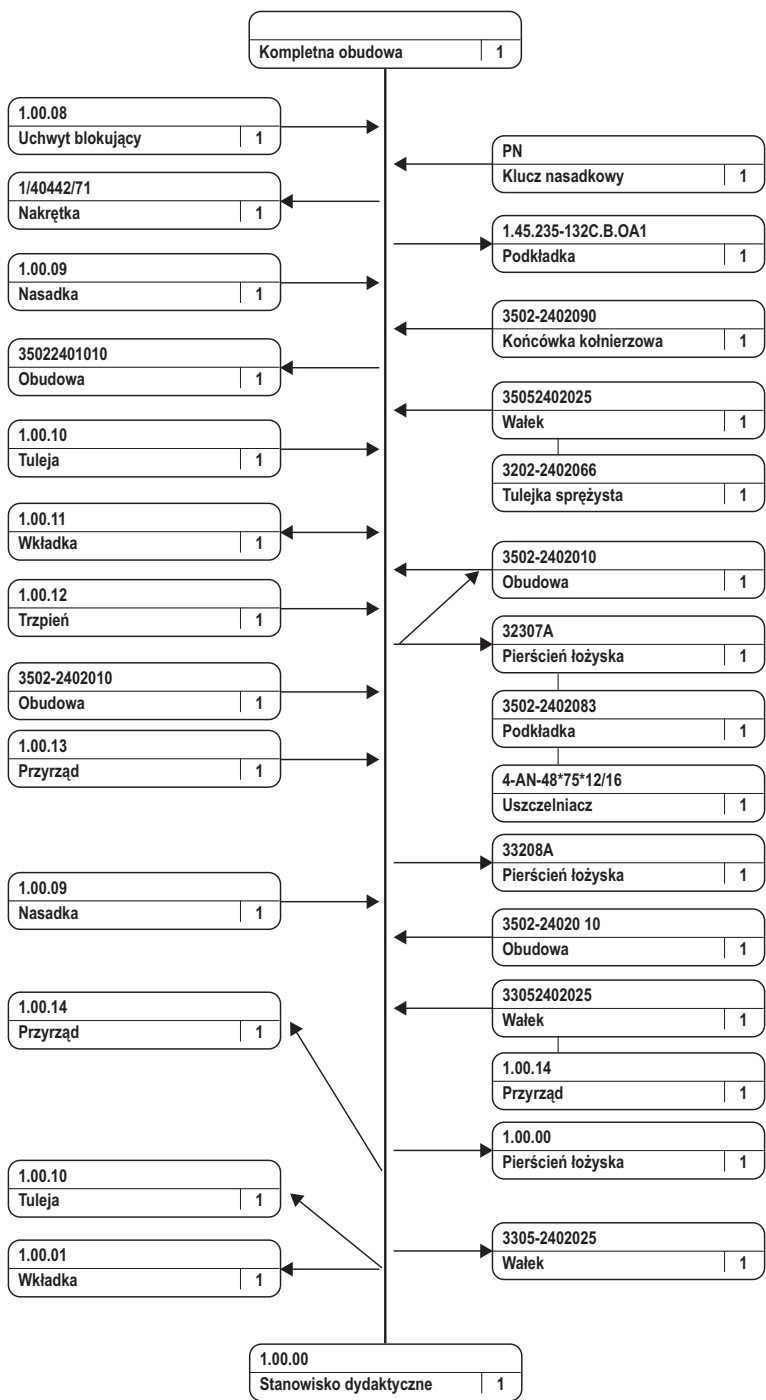


Rys. 4.19. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 4 montażu

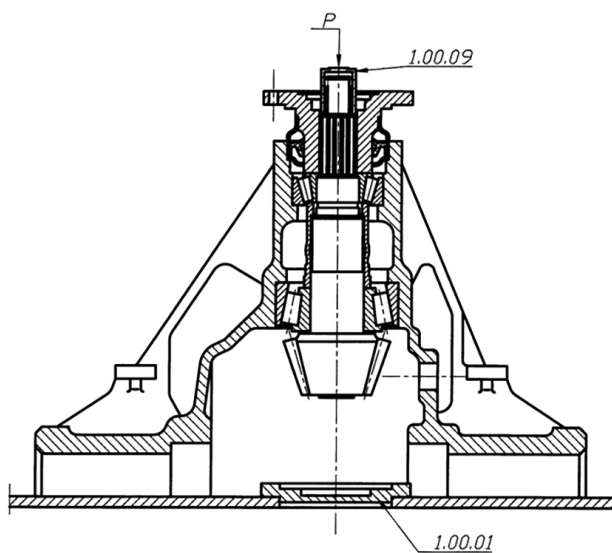
4.5.4. Przebieg demontażu

Po czynnościach pomiarowych i sprawdzeniu prawidłowości montażu należy przeprowadzić demontaż zespołu według kolejności przedstawionej w opisie i na technicznym schemacie demontażu (rys. 4.20).

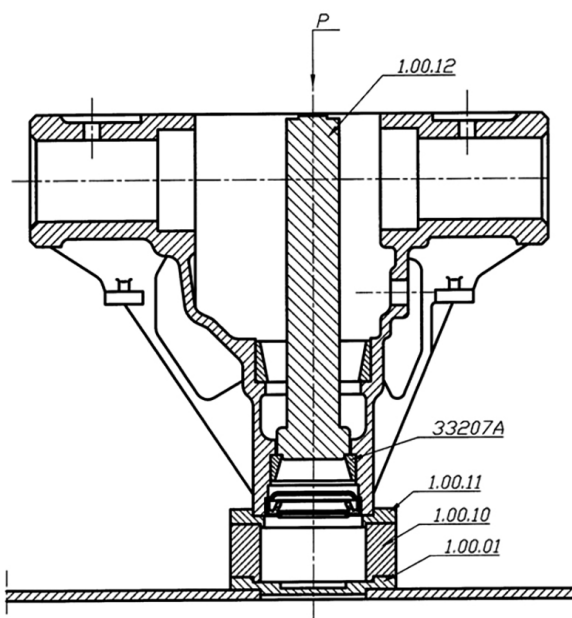
1. Zablokować końcówkę kołnierзовą nr 3502-242090 uchwytem blokującym nr 1.00.08.
2. Odkręcić nakrętkę nr 1/40442/71 kluczem dynamometrycznym lub nasadowym.
3. Zdjąć nakrętkę, podkładkę oraz uchwyt blokujący nr 1.00.08.
4. Wycisnąć wałek przy użyciu nasadki nr 1.00.09.
5. Wyjąć końcówkę kołnierзовą z obudowy (rys. 4.21).
6. Odchylić ramię praski w pozycję ułatwiającą zdjęcie obudowy.
7. Zdjąć obudowę mostu ze stanowiska.
8. Zdjąć wałek i wkładkę nr 1.00.05 z wkładki nr 1.00.01.
9. We wkładkę nr 1.00.01 wstawić tulejkę nr 1.00.10 i włożyć wkładkę nr 1.00.11.
10. Na wkładce ustawić obudowę mostu i przy użyciu trzpienia nr 1.00.12 wycisnąć uszczelniacz i pierścień zewnętrzny łożyska nr 33207A (rys. 4.22).
11. Zdjąć obudowę ze stanowiska.
12. Ustawić obudowę na stole i przy użyciu przyrządu nr 1.00.13 wycisnąć pierścień zewnętrzny łożyska 32308 z obudowy (rys. 4.23).
13. Zdjąć obudowę.
14. Ustawić we wkładce nr 1.00.01 tuleję nr 1.00.10, włożyć wałek wraz z przyrządem nr 1.00.14 i przy użyciu nasadki nr 1.00.15 wcisnąć pierścień wewnętrzny łożyska 32308 (rys. 4.24).



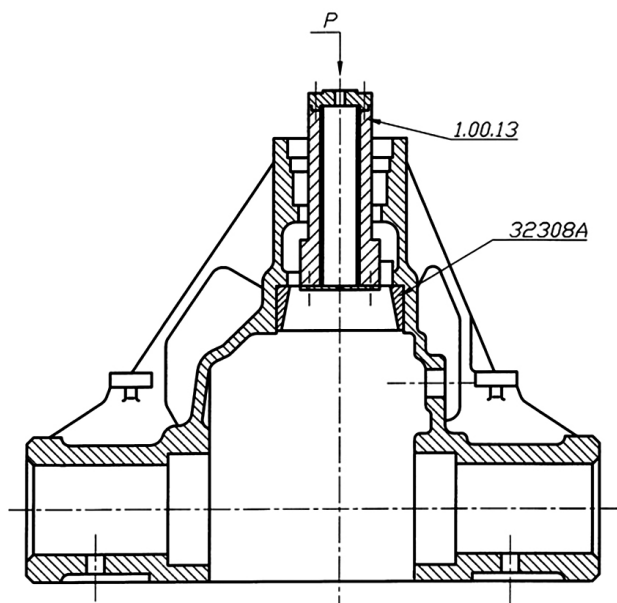
Rys. 4.20. Schemat demontażu wałka napędzającego tylnego mostu



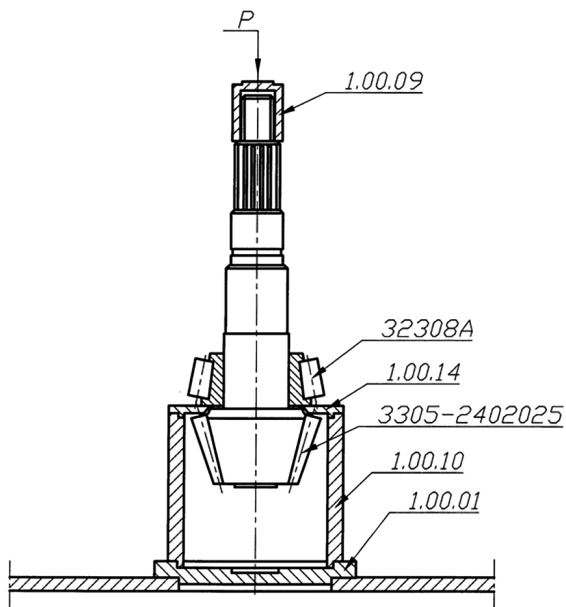
Rys. 4.21. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 1 demontażu



Rys. 4.22. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 3 demontażu



Rys. 4.23. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 4 demontażu



Rys. 4.24. Rysunek pomocniczy przedstawiający czynności wykonywane w punkcie 5 demontażu

4.5.5. *Sprawozdanie*

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
2. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. WN PWN, Warszawa 1995.
2. Nowikow M. P.: *Podstawy technologii montażu maszyn i mechanizmów*. WNT, Warszawa 1972.
3. Puff T., Sołtys W.: *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1980.
4. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
5. Richter E.: *Montaż w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1980.
6. Wierchoń S.: *Technologia montażu*. WU Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.

5. Montaż przekładni zębatych

Połączenia zębate, zwane też przekładniami zębatymi, są jednym z rodzajów połączeń konstrukcyjnych czynnych, których elementy są powiązane za pomocą wstępnie ukształtowanych przyłączy i łączników, a które stanowią część pośredniczącą zespołu napędowego mającą postać mechanizmu o członach sztywnych. Mechanizmem, o którym mowa w powyższej definicji, jest przekładnia mechaniczna, której zadaniem, oprócz przenoszenia energii, jest zazwyczaj zmiana prędkości, a czasem zmiana kierunku i charakteru ruchu, co naturalnie powiązane jest ze zmianą sił i momentów [2].

Przy montażu przekładni zębatych należy zadbać o to, aby wzajemne położenie współpracujących kół było prawidłowe, a więc [9]:

- był zapewniony właściwy luz międzyzębny,
- ślad dolegania był dostatecznie duży oraz właściwie rozmieszczony.

Właściwy luz międzyzębny zapewnia swobodne zazębienie się kół nawet wówczas, gdy temperatura przekładni wzrośnie (w granicach dopuszczalnych), co powoduje zwiększenie się wymiarów kół i zmniejszenie luzu [4]. Luz w zazębieniu jest konieczny do kompensacji możliwych odchyłek wymiarowych zębów, odchyłek położenia osi kół zębatych oraz zmian wymiarów i kształtów zębów powstałych wskutek nagrzania się przekładni w czasie pracy. Jednocześnie luz jest przyczyną powstawania uderzeń przyspieszających zużycie zębów, jak również tzw. martwego ruchu, kiedy to obrót koła napędzającego nie powoduje obrotu koła napędzanego. Z tych względów wartości luzów są ustalone w odpowiednich normach lub warunkach technicznych [8]. Wartość i położenie śladów dolegania wpływa na trwałość przekładni i na sposób smarowania.

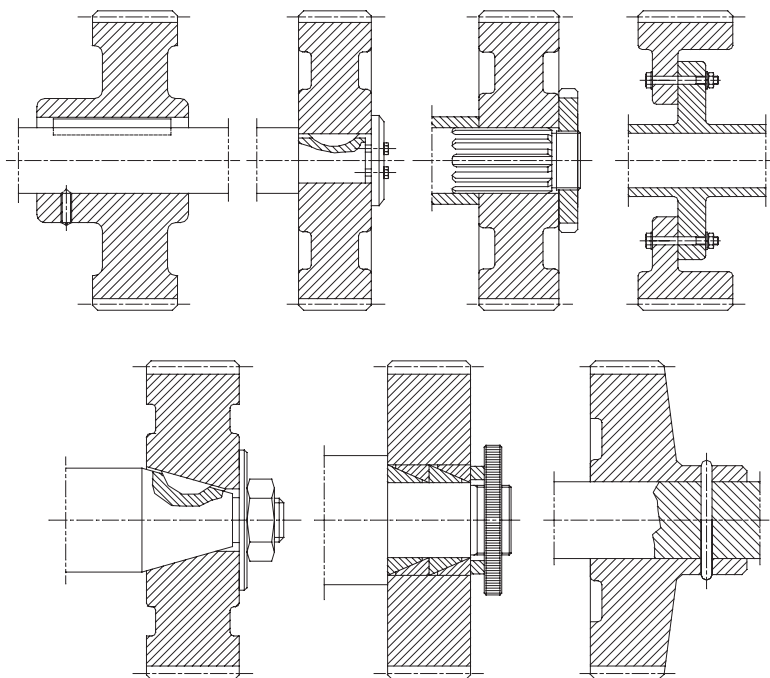
Montaż przekładni zębatych, w ogólnym ujęciu, jest przeprowadzany w trzech następujących etapach [6]:

- osadzanie kół zębatych na wałach,
- osadzanie wałków z kołami zębatymi w korpusie,
- sprawdzenie zazębienia.

W zależności od wzajemnego położenia osi kół rozróżnia się połączenia zębate: równoległe, kątowe i wichrowate, a ze względu na charakter zazębienia: czołowe i śrubowe [7].

5.1. Montaż przekładni zębatych

Przykładowe sposoby osadzania kół zębatych na wałach przedstawiono na rysunku 5.1 [4].

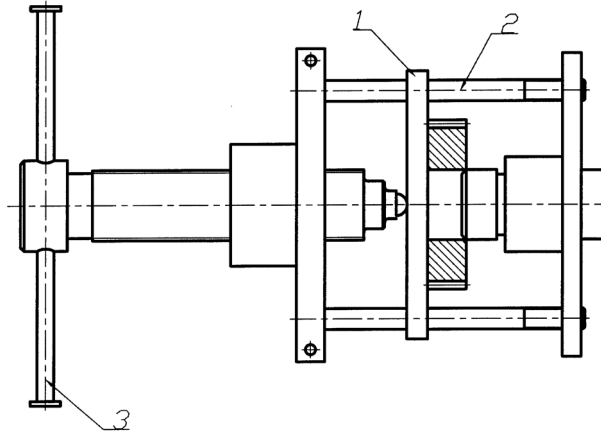


Rys. 5.1. Przykłady sposobów osadzania kół zębatych na wałach

Osadzanie kół zębatych na wałach może być realizowane z niewielkim luzem lub wciskiem ($H7/j6$ lub $H7/k6$) – w przekładniach mało- i średnioobciążonych, oraz z wciskiem ($H7/m6$ lub $H7/k6$) – przy obciążeniach średnich i dużych. Istnieje również możliwość wklejania kół na czopy wałów. Wówczas należy pozostawić luz według zaleceń producenta kleju (na ogół ponad 0,1 mm). Przed nasadzeniem koła zębatego na wał należy sprawdzić poprawność wykonania otworu koła oraz tej części wału, na której ma być osadzone koło [5].

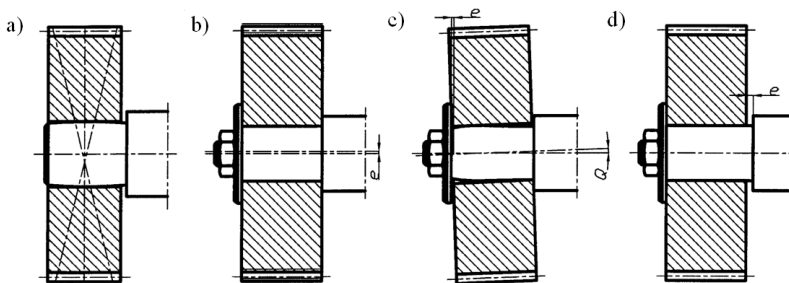
Ręczne osadzanie kół zębatych na wałach stosuje się w przypadku osadzania kół nieobranych cieplnie o niewielkich rozmiarach. Ten sposób montażu ogranicza się do stosowania dla przekładni, dla których nie jest wymagana duża dokładność oraz gdy nie przenoszą one dużych obciążeń. Koła na wale osadza się za pomocą prasy lub przy użyciu specjalnych przyrządów, co zapewnia zachowanie ścisłej współosiowości otworu koła zębatego i wału. Przykład takiego przyrządu przedstawiono na rysunku 5.2 [7]. W prezentowanym rozwiązaniu koło zębate ustawia się na płycie oporowej 1, która

może przesuwać się po dwóch sworzniach prowadzących 2. Obracając pokrętkę 3, wymusza się przesuw płyty z kołem zębatym, co w konsekwencji prowadzi do osadzenia koła na czopie wału przy zachowaniu osiowego ustawienia łączonych elementów.



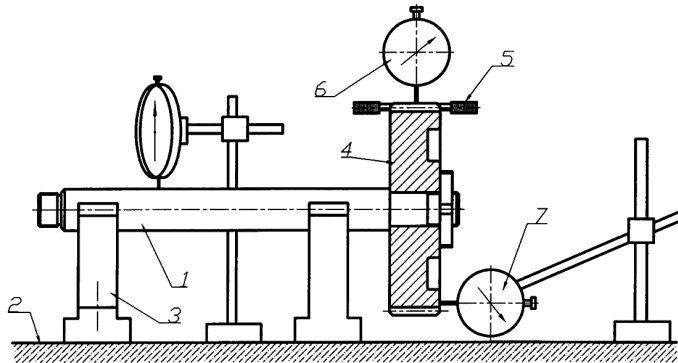
Rys. 5.2. Przykład przyrządu do osadzania koła zębatego na wale: 1 – płyta oporowa, 2 – sworznie prowadzące, 3 – pokrętko

Najczęściej popełniane błędy podczas osadzania kół przedstawiono na rysunku 5.3. Są to wahania koła na czopie wału (rys. 5.3a), bicie promieniowe (rys. 5.3b), bicie powierzchni czołowych (rys. 5.3c) oraz niedostateczne przyleganie kołnierza czopa (rys. 5.3d). Błędy te powstają w wyniku niewłaściwego wykonania elementów łączonych lub montażu i wpływają na pracę przekładni zębatej. Z tego względu po przeprowadzeniu montażu koła zębatego na wale zespół taki powinien być poddany kontroli [7].



Rys. 5.3. Typowe błędy występujące podczas osadzaniu kół zębatych na wałkach

Przykład kontroli prawidłowości osadzenia koła zębatego na wale przedstawiono na rysunku 5.4. Wałek 1, z osadzonym kołem zębatym 4, ustawiony jest na pryzmach 3, które z kolei są ustawione na płycie 2. Przesuwając czujnik wzdłuż wałka, można sprawdzić, czy jego oś jest równoległa do płaszczyzny. Po ustawieniu do kolejnych wrębów międzyzębnych trzpień kontrolnego 5 należy określić bicie promieniowe jako różnicę między odczytami wskazań czujnika 6. Za pomocą czujnika 7 można określić bicie czołowe. Jego wartość zależna jest od dokładności wykonania elementów przekładni i dokładności montażu i z reguły nie powinna przekroczyć 0,05 mm.



Rys. 5.4. Schemat kontroli prawidłowości osadzenia koła zębatego na wale: 1 – wałek, 2 – płyta, 3 – pryzma, 4 – koło zębate, 5 – trzpień kontrolny, 6, 7 – czujnik

Opisany sposób sprawdzania osadzania kół zębatych jest prosty, jednak pracochłonny, a przez to mało wydajny. Z tych względów w produkcji wielkoseryjnej są stosowane specjalne przyrządy i maszyny do sprawdzania poprawności osadzenia kół zębatych.

Jakość drugiego etapu montażu, polegającego na osadzeniu zespołu wałek–koło zębate w korpusie, zależy od dokładności:

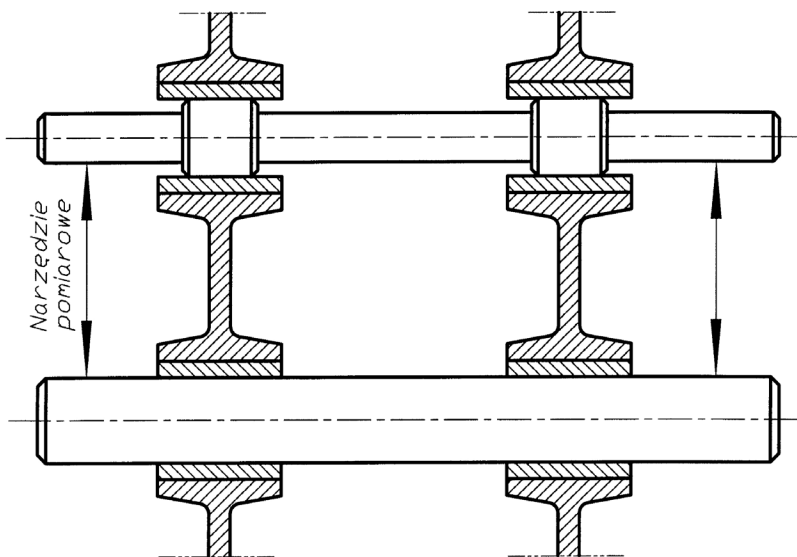
- położenia osi wałków w jednej płaszczyźnie,
- równoległości osi,
- odstępów między osiami wałów, zapewniającego właściwy luz międzyzębny, czyli spełnienia warunku:

$$a=R_1+R_2+t=0,5m(z_1+z_2)+t \quad (5.1)$$

gdzie:

- R_1 i R_2 – promienie kół podziałowych,
- z_1 i z_2 – liczby zębów kół,
- m – moduł,
- t – wartość dodatkowego luzu między osiami wałów:
 - $(0,03 \text{ do } 0,1)$ dla modułów $0,5 - 1,0 - 1,5$
 - $(0,08 \text{ do } 0,3)$ dla większych modułów.

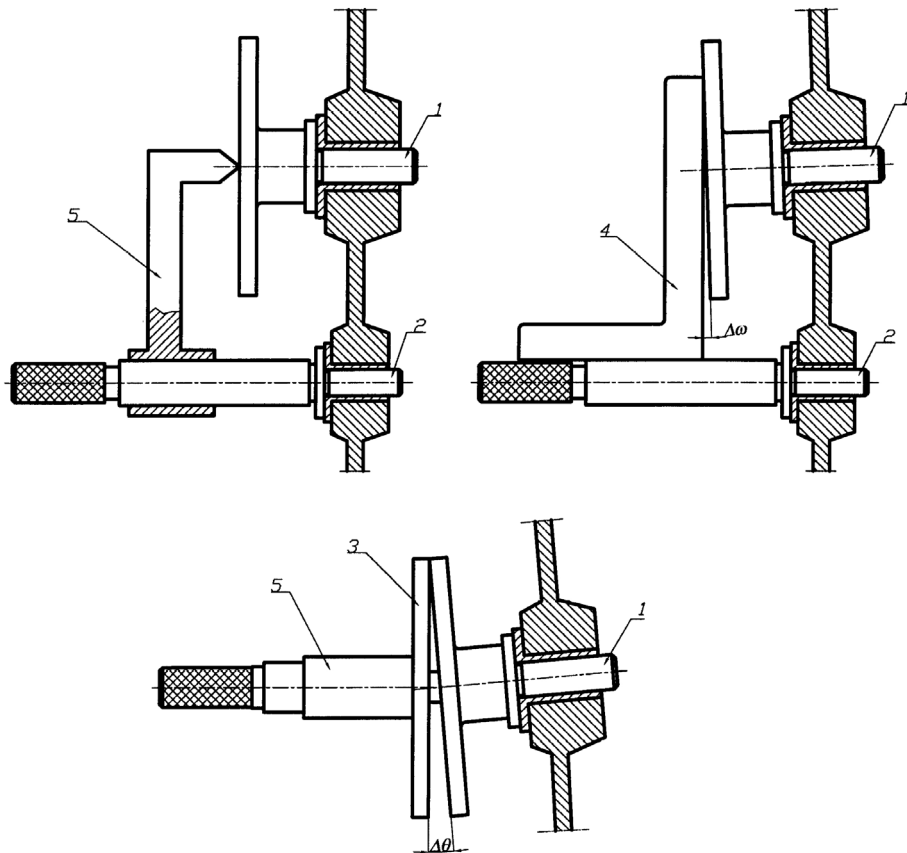
Tolerancje odległości między osiami określa się zgodnie z obowiązującymi normami w zależności od rodzaju połączenia (PN-ISO 1328-1:2015-01), co wpływa na uzyskanie odpowiedniego luzu międzyzębnego [1]. Należy przy tym pamiętać o tym, że zwiększenie tej odległości (w granicach tolerancji) powoduje wzrost luzów międzyzębnych, a w konsekwencji dodatkowe obciążenia (zwłaszcza w przekładniach szybkobieżnych) i przyspieszenie zużycia zębów [3]. Przy zmniejszeniu odległości osi luz międzyzębny maleje, co może prowadzić do zatarcia i zakleszczenia się kół zębatach. Z tych względów drugi etap montażu przekładni zębatach rozpoczyna się od kontroli odległości i równoległości osi otworów w korpusie. Do tego celu stosuje się, oprócz specjalnych sprawdzianów, trzpienie kontrolne zwykle lub z zakończeniem talerzowym oraz inne przyrządy pomiarowe. Schematy kontroli odległości, równoległości oraz wchrowatości osi wraz z użytymi do tej kontroli narzędziami pomiarowymi przedstawiono na rysunku 5.5 i rysunku 5.6. Za pomocą tych sposobów kontroli można uzyskać wystarczającą dokładność pomiaru, pomimo że luzy występujące między trzpieniami a łożyskami mogą wpływać ujemnie na tę dokładność. W przypadku konieczności zwiększenia dokładności pomiaru stosuje się trzpienie rozprężne lub bardziej precyzyjne przyrządy kontrolne.



Rys. 5.5. Schemat kontroli odległości i równoległości osi otworów w korpusie za pomocą trzpieni kontrolnych

Trzeci etap montażu walcowych przekładni zębatach polega na sprawdzeniu poprawności zazębienia. Jakość wykonania przekładni zębatach określa się właściwym przyleganiem zębów, płynnością pracy i cichobieżnością, na co składa się dokład-

ność wykonania uzębień kół oraz dokładność montażu. Teoretycznie należałoby przyjąć, że jeżeli koła zębate i czopy, na których te koła są osadzone, jak również otwory w kadłubie zostały wykonane w granicach tolerancji, to w wyniku montażu zazębienie kół powinno być prawidłowe. Jednak w praktyce często zdarza się, że w wyniku niekorzystnego sumowania się rzeczywistych odchyłek lub wskutek popełnienia błędów w trakcie montażu zazębienie jest nieprawidłowe. W takich przypadkach wyniki kontroli przeprowadzonej w trzecim etapie montażu przekładni zębatej powinny, oprócz stwierdzenia nieprawidłowości zazębienia, wskazać przyczyny tej nieprawidłowości.



Rys. 5.6. Schematy kontroli nierównoległości oraz wichrowatości osi: 1 – trzpień kontrolny z końcówką talerzową, 2 – trzpień kontrolny zwykły, 3 – linijka wzorcarska, 4 – kątownik ze stopką w postaci pryzmy, 5 – tulejka z linijką wzorcarską

Wynik przeprowadzonej kontroli w przypadku wykrycia nieprawidłowości powinien wskazać możliwość usunięcia błędów montażu lub wymiany elementów zespołu

w przypadku ich błędnego wykonania. Za podstawowe kryteria oceny prawidłowości pracy walcowej przekładni zębatej przyjmuje się:

- wartość i położenie śladów zazębienia,
- wartość i równomierność luzu międzyzębnego,
- poziom hałasu rejestrowanego przy próbie bez obciążenia i z obciążeniem [7].

Wartość i położenie śladów zazębienia uzyskuje się metodą odwzorowania na papierze poprzez umieszczenie pomiędzy dwiema kartkami papieru kalki i umieszczenie ich pomiędzy zębami obracających się kół. Wymiary śladów styku, które powstaną na bokach zębów koła zębatego współpracującego, powinny znajdować się w określonym stosunku do wysokości i szerokości zęba, przy czym wartość tego stosunku powinna być tym większa, im dokładniejsza jest przekładnia (rys. 5.7):

$$\frac{b}{B} \cdot 100 = 40 \div 90\% \quad (5.2)$$

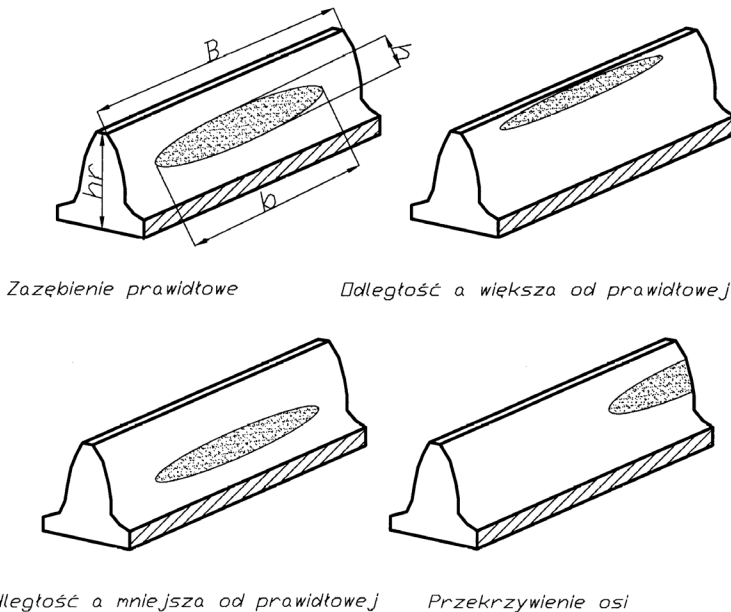
oraz

$$\frac{h}{h_r} \cdot 100 = 30 \div 70\% \quad (5.3)$$

gdzie:

b i B – odpowiednio szerokość śladu zęba, h i h_r – wysokość śladu i zęba (rys. 5.6).

Położenie śladów zazębienia daje pogląd o wartości luzu międzyzębnego, a przez to o prawidłowości zazębienia (rys. 5.7).



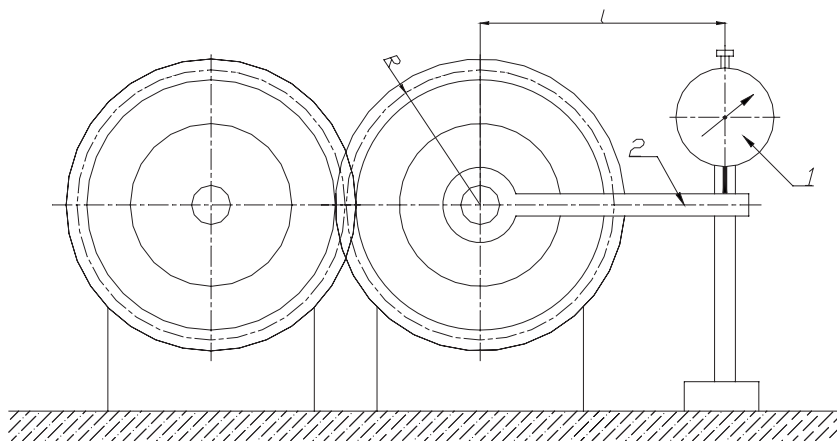
Rys. 5.7. Określenie prawidłowości i nieprawidłowości zazębienia się kół za pomocą śladów styku

Wartość luzu międzyzębego można określić przy użyciu przyrządu, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.8. W przypadku wykrycia nieprawidłowości należy ustalić przyczynę nieprawidłowości zazębienia. Jeżeli luz międzyzębny jest za duży na całym obwodzie, wówczas może to wynikać z następujących przyczyn [7]:

- wszystkie zęby jednego koła są za cienkie,
- wszystkie zęby obu kół są za cienkie,
- odległość między osiami jest większa od wymaganej.

Zbyt mała wartość luzu międzyzębego na całym obwodzie świadczy o tym, że zęby jednego lub obu kół zębatych są zbyt grube bądź też, że odległość między osiami jest zbyt mała.

Przy montażu dużych kół zębatych o dużym module luz międzyzębny kontroluje się przez zgniatanie między zębami kół ołowianych drucików zakładanych wzdłuż długości zębów. Średnice stosowanego do kontroli drutu powinny być równe $1,4 \div 1,5$ wartości luzu międzyzębego. Zmierzona grubość zgniecionych po obu stronach zęba drutów jest równa wartości luzu międzyzębego.



Rys. 5.8. Schemat pomiaru luzu międzyzębego: 1 – czujnik, 2 – zabierak osadzony na wałku,
R – promień koła podziałowego, l – długość ramienia zabieraka

Po zmontowaniu i nasmarowaniu przekładni poddaje się ją próbom pracy pod obciążeniem i przy biegu luzem. Jednocześnie sprawdza się temperaturę elementów oraz poziom emitowanego przez nią hałasu. Przykładowe dopuszczalne natężenie hałasu przekładni zębatych przy różnych prędkościach obrotowych podano w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Dopuszczalne natężenia hałasu przekładni zębatych

Prędkość obwodowa zębów kół zębatych m/s	Natężenie dźwięku	
	dB	Ocena
5÷6,5	80÷85 86÷90 91÷95	Bardzo dobra Dobra Dostateczna
6,6÷8	8590 91÷95 96÷100	Bardzo dobra Dobra Dostateczna
8,1÷9,5	90÷95 96÷100 101÷105	Bardzo dobra Dobra Dostateczna

Badania poziomu hałasu przekładni zębatych w warunkach przemysłowych są trudne, a wyniki pomiarów zależą nie tylko od mocy akustycznej badanego obiektu, ale także często od mocy akustycznej maszyn bezpośrednio sąsiadujących z przekładnią i od właściwości akustycznych hali.

5.2. Wykonanie ćwiczenia

5.2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z technologią montażu przekładni zębatej, przeprowadzenie kontroli wzajemnego położenia osi wałów na stanowisku modelowym oraz sprawdzenie prawidłowości zazębienia.

5.2.2. Program realizacji ćwiczenia

W celu poprawnej realizacji ćwiczenia należy:

- przeprowadzić pomiary niezbędne do obliczenia odległości osi wałów kół zgodnie ze wzorem (5.1),
- obliczyć minimalną (zerową) odległość osi a_o ,

$$a_o = R_1 + R_2 = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{m \cdot z_1 + m \cdot z_2}{2} \quad (5.4)$$

- ustawić osie wałów równolegle, zachowując obliczoną odległość a , wykorzystując do tego celu suwmiarkę oraz czujnik mikrometryczny,
- obliczyć luz międzyzębny według wzoru:

$$l_o = -(\Delta g_1 + \Delta g_2) + 2\Delta a \cdot \operatorname{tg} \alpha_w \quad (5.5)$$

gdzie:

- Δg_1 i Δg_2 – odchyłki rzeczywiste grubości zębów kół współpracujących,
 Δa – odchyłka odległości osi od położenia teoretycznego,
 α_w – toczy kąt przyporu (roboczy kąt przyporu), który można obliczyć z wzoru:

$$\cos \alpha_w = \frac{a_o}{a_r} \cos \alpha_o \quad (5.6)$$

$$\alpha_w = \arccos \left(\frac{m \cos \alpha}{2(a_o + \Delta a)} (z_1 + z_2) \right) \quad (5.7)$$

- α_o – nominalny kąt zarysu,
 a_r – rzeczywista odległość osi,
 a_o – zerowa odległość osi, obliczona z wzoru:

$$a_o = \frac{z_1 + z_2}{2} m \quad (5.8)$$

lub stosując wzór uwzględniający korekcję:

$$l_o = m \cdot \cos \alpha [(z_1 + z_2)(\operatorname{inv} \alpha_w - \operatorname{inv} \alpha) - 2 \operatorname{tg} \alpha (x_1 + x_2)] \quad (5.9)$$

gdzie:

- x_1 i x_2 – współczynniki korekcji;

$$\operatorname{inv} \alpha_i = \operatorname{tg} \alpha_i - \left(\alpha_i \cdot \frac{\pi}{180} \right) \quad (5.10)$$

- stosując metodę pomiaru zaprezentowaną na rysunku 5.8, należy przeprowadzić pomiar luzu międzyzębnego, obracając koła o co trzeci ząb. Uzyskane wyniki pomiarów należy zestawić w tabeli oraz sporządzić wykres obrazujący zmianę luzu międzyzębnego w funkcji obrotu kół $l_o f(\phi)$,
- stosując metodę pomiaru przedstawioną na rysunku 5.4, należy przeprowadzić pomiar bicia czołowego obu kół współpracujących,
- przeprowadzić pomiar wartości i położenia śladów zazębienia, stosując sposób opisany we wprowadzeniu. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzić analizę ustawienia przekładni,
- przeprowadzić pomiar bicia promieniowego kół zębatych.

Pomiary luzu należy przeprowadzać przy zablokowanej osi biernej – stosując zacisk śrubowy.

5.2.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Bartosiewicz J.: *Technologia dla mechanika obróbki skrawaniem*. WSiP, Warszawa 1989.
2. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. WN PWN, Warszawa 1995.
3. Klekot G.: *Luz międzyzębny jako parametr stanu technicznego przekładni zębatej*. Referaty naukowe XVII Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn, Lublin–Nałęczów 1995.
4. Nowikow M. P.: *Podstawy technologii montażu maszyn i mechanizmów*. WNT, Warszawa 1972.
5. Ochęduszek K.: *Koła zębate*. WNT, Warszawa 1968.
6. Puff T., Sołtys W.: *Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1980.
7. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. PWN, Warszawa 1977.
8. Richter E.: *Montaż w budowie maszyn*. WNT, Warszawa 1980.
9. Wierchoń S.: *Technologia montażu*. WU Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.

6. Połączenia klejowe tworzyw polimerowych

Klejenie jest jedną z metod wykonywania połączeń spoczynkowych nierozłącznych. W czasie klejenia powierzchnie łączonych części pokrywa się warstwą materiału adhezyjnego (np. kleju, kitu, uszczelniacza), który w określonych warunkach (dzięki siłom adhezji) oraz wewnętrznej spójności (sił kohezji) jest zdolny do nierozłącznego połączenia tych części [9].

Adhezja (łac. *adhesio* – szepianie) jest zjawiskiem powierzchniowym, polegającym na szepianiu stykających się ciał wskutek oddziaływania między nimi pola sił. Pole sił wytwarzane przez ładunki atomów (cząsteczek, jonów), z których zbudowana jest warstwa wierzchnia, maleje wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od powierzchni (praktycznie oddziaływanie sił Van der Waalsa zanika powyżej 1–2 nm). Dlatego też dla zaistnienia adhezji konieczne jest odpowiednie zbliżenie łączonych ciał.

Kohezja (łac. *cohaesio* – stykanie się) jest to właściwość ciał polegająca na przeciwstawianiu się rozdzielaniu ich na części. Źródłem kohezji są oddziaływania między cząsteczkami lub atomami tych ciał. Największą kohezję wykazują ciała stałe, znacznie mniejszą ciecze, a prawie jej zupełnym brakiem charakteryzują się gazy.

Kohezją, czyli spójnością spoiny klejowej, określa się jej wytrzymałość mechaniczną, będącą przejawem wzajemnego przyciągania się cząsteczek spoiny. Zniszczenie kohezji następuje wówczas, gdy siły wiązań międzycząsteczkowych kleju ustępują siłom spójności i siłom obciążenia zewnętrznego. Zgodnie z regułą, że łańcuch jest tak mocny, jak najsłabsze jego ogniwo, siły adhezji i kohezji powinny mieć zbliżone wartości.

Zdolność zwilżania powierzchni przez płynny klej uzależniona jest od energii powierzchniowej materiałów. Klej zwilża wystarczająco powierzchnię materiału tylko wówczas, gdy jego napięcie powierzchniowe jest przynajmniej równe lub mniejsze od energii powierzchniowej danego materiału.

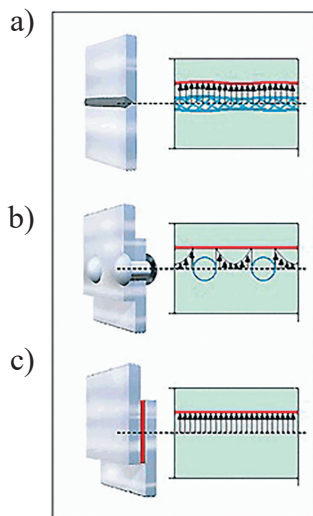
Klejenie umożliwia łączenie prawie wszystkich materiałów za pomocą tworzyw adhezyjnych. W niektórych przypadkach klejenie jest praktycznie jedynym sposobem wykonywania połączenia, np. w łączeniu cienkich ścianek lub w łączeniu elementów o bardzo dużej różnicy grubości.

6.1. Zalety i ograniczenia stosowania połączeń klejowych

Wśród korzyści stosowania połączeń klejowych można wymienić [2]:

- mały koszt wytwarzania połączeń,
- mniejszą masę tak wykonanej konstrukcji,
- zwiększenie estetyki połączenia,
- polepszenie warunków pracy i niezawodności połączenia,
- możliwość łączenia różnych materiałów,
- możliwość łączenia materiałów o znacznej grubości z cienkimi foliami,

- niepowodowanie zmian strukturalnych w klejonych materiałach (w odróżnieniu od spawania, zgrzewania, lutowania – rysunek 6.1),
- możliwość tłumienia drgań,
- odporność na działanie paliw, olejów, wody i innych substancji (dotyczy to większości połączeń klejowych),
- brak otworów na powierzchniach osłabiających przekroje i stanowiących miejsca spiętrzenia naprężeń (które występują w przypadku innych sposobów łączenia),
- niepowodowanie korozji bimetalicznej,
- możliwość łączenia elementów o bardzo małych rozmiarach.



Rys. 6.1. Rozkład naprężeń w połączeniach: a) spawanych, b) nitowanych, c) klejowych

Do ograniczeń stosowania połączeń klejowych należy zaliczyć [2]:

- mały zakres dopuszczalnej temperatury eksploatacji,
- małą odporność na odrywanie (zwłaszcza nierównomierne),
- ograniczoną dopuszczalność obróbki mechanicznej po utwardzeniu kleju,
- stosunkowo długi czas utwardzania i wiązania wielu wysokowytrzymałościowych klejów,
- konieczność uzyskania i podtrzymywania wysokiej temperatury oraz znacznych nacisków w czasie utwardzania wielu klejów,
- konieczność stosowania specjalnych sposobów przygotowania powierzchni celem zapewnienia odpowiedniej adhezji kleju,
- dużą liczbę i znaczną pracochłonność operacji kontrolnych,
- skłonność połączenia adhezyjnego do pęcznienia przy długotrwałym działaniu znacznych obciążeń statycznych,
- stosunkowo szybkie starzenie połączeń klejowych.

6.2. Przebieg procesu klejenia

W każdym procesie klejenia można wyróżnić kilka podstawowych etapów [4, 8]:

1. przygotowanie powierzchni,
2. sporządzanie kleju,
3. nanoszenie kleju,
4. podsuszanie (szczególnie w przypadku klejów kauczukowych),
5. składanie łączonych elementów,
6. tworzenie spoiny klejowej,
7. operacje uzupełniające,
8. kontrola jakości.

Przygotowanie powierzchni ma zasadniczy wpływ na jakość połączenia i jest uzależnione od rodzaju łączonych materiałów [3]. Podstawowym celem operacji przygotowania powierzchni jest wyeksponowanie warstwy materiału bez zanieczyszczających jej tlenków, powłok czy zanieczyszczeń w postaci osadów, szczególnie tłuszczów. Ponadto przygotowanie powierzchni ma na celu osiągnięcie rozwinięcia powierzchni i zwiększenie jej zwilżalności klejem, co pozytywnie wpływa na adhezję mechaniczną i skutkuje większą wytrzymałością adhezyjną połączeń [4, 13, 14]. Celem przygotowania powierzchni jest poprawa zarówno właściwości połączenia klejowego, jak i jego trwałości w dłuższym okresie – szczególnie, gdy jest ono wystawione na działanie agresywnych warunków środowiskowych. Wymaga to użycia odpowiednich metod, zarówno czyszczenia, jak i modyfikacji powierzchni elementów. Optymalna obróbka powierzchni łączonych elementów jest konieczna w szczególności przy klejeniu konstrukcji krytycznych ze względów bezpieczeństwa. W sytuacji, gdy połączenia klejowe będą tylko nieznacznie obciążane, zastosowanie klejów, które mają zdolność rozpuszczania i absorbowania lekkich olejów umożliwi ograniczenie zakresu przygotowania powierzchni bądź całkowicie wyklucza taką konieczność. Wiele materiałów wykazuje lepsze właściwości adhezyjne powierzchni po obróbce ubytkowej, tj. np. po szlifowaniu, docieraniu lub polerowaniu, w szczególności, gdy powierzchnia wyjściowa jest gładka i niechropowata. Z uwagi na znaczną różnorodność materiałów poddawanych klejeniu – obróbka warstwy wierzchniej zapewniająca maksymalne właściwości wytrzymałościowe połączenia może się od siebie znacznie różnić, a zastosowanie metod odpowiednich dla jednego rodzaju powierzchni może skutkować pogorszeniem właściwości adhezyjnych na innym.

Jednym ze sposobów zdjęcia warstwy materiału z powierzchni przygotowywanej do klejenia jest trawienie chemiczne, tj. zanurzenie w kąpeli agresywnego roztworu kwasu. Normy PN-EN 13887:2005P (Kleje do połączeń konstrukcyjnych, wytyczne przygotowania powierzchni metali i tworzyw sztucznych przed klejeniem) i ASTM D2651 [1] podają wiele sugerowanych parametrów kąpeli trawiącej wraz z warunkami przeprowadzania procesu wytrawiania i ewentualnymi dodatkowymi

operacjami zabezpieczającymi powierzchnię tuż po trawieniu. Są one zależne od rodzaju obrabianego materiału.

Kolejnym sposobem usunięcia zanieczyszczonej warstwy materiału z powierzchni do klejenia jest obróbka mechaniczna. Metoda ta poza funkcją oczyszczania powierzchni ma podobnie jak trawienie chemiczne powodować również jej modyfikację w celu zapewnienia lepszych właściwości adhezyjnych. Tzw. rozwijanie geometryczne powierzchni w operacji chropowacenia polega na zwiększeniu jej rzeczywistej powierzchni na skutek wprowadzania mikronierówności w jej strukturę. Proces ten może być przeprowadzany na kilka sposobów:

- ręcznie – włókniną ścierną lub wodoodpornym papierem ściernym,
- mechanicznie – szcotkami drucianymi, papierem ściernym lub za pomocą obróbki strumieniowo-ściernej.

Dobór rodzaju ścierniwa zależy od rodzaju materiału, z którego powierzchnia jest czyszczona. Niewłaściwy dobór może skutkować pogorszeniem właściwości powierzchni [11]. Dobór rozmiaru ziarna w celu uzyskania najlepszych parametrów energetycznych jest cechą indywidualną, zależną od badanego materiału.

Powierzchnie materiału przygotowywanego do klejenia można również ulepszać poprzez zastosowanie środków sprzęgających (promotorów adhezji). Są to substancje używane do poprawy właściwości procesu klejenia, składające się ze związków reagujących z cząsteczkami dwóch różnych substancji (kleju i powierzchni), na skutek czego działają na zasadzie chemicznego mostka między nimi.

Znane są, lecz rzadko stosowane, również inne metody ubytkowej modyfikacji powierzchni, które można stosować do materiałów stalowych. Jedną z nich jest obróbka laserem, np. technologia CLP (Ciba Laser Pretreatment) firmy Ciba. Jest to dwustopniowa technologia stosowana na stali nierdzewnej, polegająca na pokryciu fragmentu części przygotowywanej do klejenia warstwą podkładową (primer) i po jej osuszeniu obróbce za pomocą lasera. Metoda nie tylko znacznie poprawia wytrzymałość połączenia klejowego, ale jest również szybsza, tańsza oraz bardziej ekologiczna od tradycyjnego wytrawiania w kąpeli chemicznej. Kolejną metodą, odmienną w sensie technologicznym od obróbki ubytkowej, a pozwalającą modyfikować parametry powierzchni, jest napawanie plazmowe, polegające na naniesieniu materiału podanego w postaci proszku, drutu lub pręta za pomocą strumienia gorącego gazu. W przypadku stali mogą być to np. powłoki niklowo-chromowe lub nikolowo-chromowo-cynkowe. Mikrochropowatość i stopień rozwinięcia powierzchni uzyskanej powłoki mogą być kontrolowane za pomocą m.in.: parametrów cząsteczek (temperatury, stopnia stopienia, prędkości i kształtu), parametrów wyjściowych powierzchni (kształtu, chropowatości, składu chemicznego), temperatury powierzchni i powłoki na etapach napawania oraz geometrycznych parametrów natryskiwania (kierunku, kształtu oraz powtarzalności ścieżek).

Metoda sporządzenia kleju zależy od jego rodzaju. W przypadku klejów chemo-utwardzalnych ważne są ilości przygotowanego jednorazowo kleju, sposób mieszania

utwardzacza z żywicą i ewentualnymi modyfikatorami, czas przydatności do klejenia oraz inne aspekty. Przygotowanie klejów rozpuszczalnikowych polega na rozcieńczeniu rozcieńczalnikiem w celu uzyskania pożądanej lepkości. Niektóre kleje są dostarczane w postaci gotowej do użycia [1].

O sposobie nanoszenia kleju decyduje jego postać. Najłatwiej nanosić kleje w postaci proszkowej lub w postaci cieczy o względnie małej lepkości. Kleje w postaci brył, prętów są często mielone dla ułatwienia ich rozprowadzenia. Stosuje się również podgrzewanie powierzchni, o którą pociera się bryłki kleju. Kleje nanosi się także ręcznie pędzlem, nakłada metodą fluidyzacyjną i innymi sposobami [1].

Składanie łączonych elementów i właściwe ustalenie ich względem siebie w dużym stopniu decyduje o efektach klejenia. Decyduje ono o grubości warstwy kleju, co w odpowiedzialnych konstrukcjach jest wymogiem bardzo istotnym. Składanie przyłączy odbywa się za pomocą odpowiednich elementów ustalających (kołków, śrub, klinów, względnie powierzchni negatywnych przyrządów klejarskich) [6].

Powstawanie spoiny kleju jest procesem, w którym ciekła lub uplastyczniona masa klejowa przechodzi w stan stały, przez co uzyskuje się określoną wytrzymałość połączenia. Proces ten przebiega zwykle według jednego z mechanizmów:

- utrata rozpuszczalnika przez odparowanie – typowymi klejami tworzącymi spoinę w ten sposób są kauczukowe kleje rozpuszczalnikowe i dyspersje poliocetanu winylu,
- zestalanie – tj. tworzenie spoiny wskutek ochłodzenia stopionego uprzednio kleju poniżej jego temperatury mięknięcia – w ten sposób spoinę tworzą kleje topliwe, kleje w postaci folii,
- sieciowanie żywicy – jest to proces typowy dla żywic epoksydowych i fenolowych, a także wymaga zastosowania utwardzacza.

Po utwardzaniu i odpowiednim sezonowaniu połączenia klejowego w niektórych przypadkach przeprowadza się operacje uzupełniające polegające przede wszystkim na mechanicznym usunięciu wypływek kleju, lakierowaniu lub malowaniu strefy połączenia. Mają one na celu uszczelnienie połączenia i minimalizowanie wpływu środowiska, przede wszystkim wilgoci na granicy faz [7].

Metody kontroli jakości połączenia klejowego można podzielić na niszczące i nieniszczące. Badania niszczące przeprowadza się na tzw. „próbkach świadkach”. Z niszczących metod badań połączeń klejowych najczęściej stosuje się:

- defektoskopię ultradźwiękową,
- rentgenoskopię,
- kontrolę za pomocą ciekłych kryształów,
- kontrolę za pomocą podczerwieni,
- defektoskopię akustyczną.

Wszystkie powyższe metody mają na celu lokalizację i określenie pola niedoklejeń oraz wad technologicznych, takich jak np. duże pęcherze gazowe.

Sposoby przygotowania różnych materiałów konstrukcyjnych do procesu klejenia oraz pozostałe etapy procesu klejenia zostały omówione szerzej w rozdziale 3.

6.3. Połączenia klejowe tworzyw polimerowych

Tworzywa polimerowe stanowią grupę materiałów konstrukcyjnych coraz częściej stosowanych w wielu gałęziach przemysłu. Podczas montażu części maszyn wykonanych z tworzyw polimerowych jednym z często stosowanych rodzajów połączeń są połączenia klejowe [5].

Większość z dostępnych obecnie tworzyw polimerowych można łączyć za pomocą klejów. Przygotowanie powierzchni do klejenia wielu tworzyw polimerowych opiera się na wykonaniu obróbki mechanicznej w postaci obróbki strumieniowo-ścierniej, podczas gdy inne mogą wymagać chemicznej obróbki powierzchni w celu uzyskania odpowiedniego zwilżenia.

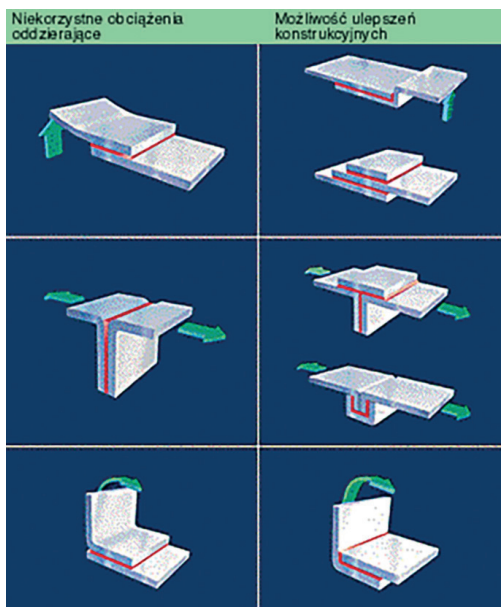
Przygotowanie powierzchni elastomerów jest uzależnione od techniki klejenia i użytego kleju. Zasadniczo inne jest bowiem klejenie z jednoczesnym wulkanizowaniem spoiny klejonej, inne zaś przy klejeniu klejami chemoutwardzalnymi. W przypadku klejenia klejami chemoutwardzalnymi, oprócz oczyszczania z pyłów, odpowiedniego schropowacenia powierzchni i jej odtłuszczenia, prowadzi się w operacjach klejenia również odpowiednią obróbkę chemiczną. Powierzchnie tworzyw wielkocząsteczkowych z reguły powinny być poddane obróbce strumieniowo-ścierniej lub szlifowane w celu usunięcia zanieczyszczeń, a częściowo również schropowacenia powierzchni.

W wielu przypadkach po mechanicznym przygotowaniu powierzchni, zależnie od klejonych tworzyw polimerowych, prowadzi się odpowiednią obróbkę chemiczną. Ma to szczególne znaczenie podczas klejenia tworzyw niepolarnych. Szczególne trudności występują przy klejeniu fluorowanych kopolimerów etyleno-propylenowych oraz politetrafluoroetyleny (teflonu).

Na wytrzymałość i jakość połączenia klejowego bezpośredni wpływ ma dobór odpowiedniego materiału klejącego. Przy wyborze kleju należy kierować się kilkoma względami, wśród których należy wymienić:

- rodzaj kleju – ma decydujący wpływ na wytrzymałość połączenia. Cechy fizyczne i chemiczne kleju decydują o sile adhezji, jak również o kohezynnej wytrzymałości połączenia klejonego. Różnorodne właściwości fizyczne klejów pozwalają na dobranie optymalnej wytrzymałości połączenia, pożądaną wartość modułu Younga, a także, co jest istotne zwłaszcza z technologicznego punktu widzenia, odpowiedni czas przydatności zmieszanego kleju, czas ustalania lub lepkość;
- łączony materiał i stan jego powierzchni – kryterium to często decyduje o doborze kleju lub konstrukcji połączenia. Parametrami mającymi wpływ na wybór kleju są także sztywność łączonych materiałów oraz inne własności mechaniczne;

- warunki środowiska pracy – mają one bezpośredni wpływ na dobór kleju, gdyż zawsze należy uwzględnić temperaturę pracy połączenia, wpływ agresywnej chemicznie atmosfery poprzez działanie rozpuszczalników i kwasów, wilgotność itp. Należy także uwzględnić czynniki będące wymaganiami, jakie stawiane są połączeniom;
- konstrukcja połączenia – właściwie skonstruowane połączenie eliminuje ograniczenia, jakimi mogą być np. niewłaściwe wypełnienie szczeliny czy praca połączenia w niekorzystnym polu obciążeń, np. oddzierających (rys. 6.2).

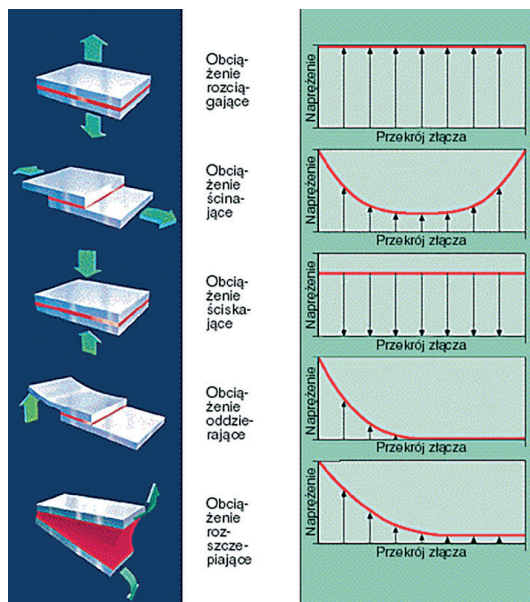


Rys. 6.2. Przykłady obciążeń oddzierających oraz sposoby ich eliminacji [12]

Często w doborze najbardziej odpowiedniego kleju pomaga wykonanie specjalistycznej ekspertyzy obejmującej uwarunkowania, jakim poddane jest połączenie klejowe. Może wiązać się to z koniecznością wykonania serii prób doświadczalnych, nie rzadko długoterminowych, często wspomaganymi analizami MES.

6.4. Wytrzymałość połączeń klejowych

Na połączenie klejowe może oddziaływać różnego rodzaju obciążenie zewnętrzne powodujące złożone stany naprężeń. Już na etapie konstruowania połączenia należy uwzględnić rodzaj i wartość obciążenia. Rozkład naprężeń w różnych warunkach obciążenia przedstawiono na rysunku 6.3 [8].



Rys. 6.3. Rodzaje obciążeń oraz powodowany nimi rozkład naprężeń w spoinie kleju [12]

W celu uzyskania odpowiedniej efektywności pracy połączenia klejowe powinny pracować, w miarę możliwości, w zakresie działania sił ścinających i/lub ściskających. W rzeczywistości czyste rozciąganie i czyste ściskanie występują bardzo rzadko. Siły oddzierające działają na połączenie klejowe wyjątkowo niekorzystnie, ale można im zapobiegać odpowiednią zmianą konstrukcji połączenia.

Aby połączenia mogły przenosić duże obciążenia, należy stosować możliwie duże powierzchnie sklejen. Spośród stosowanych połączeń połączenia poddane ścinaniu mogą przenosić największe obciążenia. Średnią wytrzymałość na ścinanie określa się (6.1) stosunkiem siły stycznej P_t powodującej ścinanie do pola A_0 ścinanych przekrojów [10, 11]:

$$R_t = \frac{P_t}{A_0} [MPa] \quad (6.1)$$

6.5. Technologia połączeń klejowych tworzyw polimerowych

W celu poprawnego wykonania połączenia klejowego konieczne jest dokładne i staranne złożenie oraz ustalenie powierzchni sklejanych elementów. Jednym z wymogów technologicznych, jakie powinno spełnić przygotowanie powierzchni klejonych elementów, jest przywieranie powierzchni ich styku bez wywierania dużych nacisków. Ustawienie klejonych elementów do określonego położenia przeprowadza się najczę-

ściej za pomocą specjalnych przyrządów. Wyposażone są one w odpowiednie przyrządy ustalające oraz dociskowe. Powoduje to niezmiennosc położenia elementów podczas utwardzania się spoiny oraz osiągnięcie wymaganego nacisku.

Nacisk jest jednym z parametrów technologicznych utwardzania spoiny klejowej. Dobór nacisków klejenia uzależniony jest od rodzaju kleju (jego gęstości, lepkości, skurczu termicznego, chemicznego skurczu utwardzania) oraz rodzaju łączonych materiałów i sposobu przygotowania ich powierzchni do klejenia. Nacisk powinien zapewniać dokładne przyleganie do siebie łączonych elementów oraz optymalną grubość spoiny (0,05–0,20 mm).

W wielu przypadkach zbyt duża siła docisku lub niewłaściwe rozmieszczenie elementów dociskowych w obszarze klejenia może doprowadzić do deformacji łączonych konstrukcji. Z jednej strony zbyt duży nacisk może powodować uzyskanie zbyt cienkiej warstwy kleju oraz możliwość powstawania miejsc bezpośredniego styku materiałów klejonych. Z drugiej strony za mały nacisk jest przyczyną uzyskania porowatej spoiny o zbyt dużej grubości. W obu przypadkach skutkuje to otrzymaniem połączenia klejowego o mniejszej wytrzymałości.

Wartość nacisków klejenia uzależniona jest przede wszystkim od skurczu utwardzania kleju. Gdy skurcz jest mały (rzędu części procenta), naciski są niewielkie i nie przekraczają z reguły 0,1 MPa. Często określa się je jako naciski kontaktowe. Jeżeli skurcz utwardzania jest duży (rzędu kilku procent), ich wartość może wahać się w granicach 0,5–2,0 MPa.

6.6. Wykonanie ćwiczenia

6.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z techniką i technologią klejenia tworzyw polimerowych, praktyczne wykonanie przykładowego połączenia zakładkowego dla różnych tworzyw polimerowych oraz oznaczanie wytrzymałości na ścinanie według normy ASTM D 1002-01.

6.6.2. Program realizacji ćwiczenia

W ramach zajęć należy wykonać następujące działania:

- Analiza właściwości materiałów przygotowanych do klejenia
Należy przeprowadzić analizę właściwości materiałów z uwzględnieniem czynników istotnych w procesie klejenia.
- Opracowanie technologii klejenia
Na podstawie przeprowadzonej analizy właściwości materiałów, które mają być łączone, należy opracować technologię klejenia dla zdefiniowanego rodzaju połączenia.

- Przygotowanie powierzchni materiałów sklejaných
Należy przygotować powierzchnie łączonych materiałów zgodnie z opracowaną technologią.
- Dobór i przygotowanie kleju
Należy spośród dostępnych środków adhezyjnych wybrać odpowiedni klej do przeprowadzenia łączenia według opracowanej technologii.
- Określenie warunków geometrycznych połączenia klejonego
Należy określić optymalne warunki geometryczne połączenia klejowego. W tym celu należy obliczyć graniczną długość zakładki, korzystając z wzoru (3.1) lub z zależności wg ASTM D1002 – 10:

$$L = \frac{F_{ty} \cdot \delta}{\tau} \quad (3.3)$$

gdzie:

L – długość zakładki [mm],

F_{ty} – granica plastyczności klejonego materiału [MPa],

δ – grubość klejonych elementów [mm],

τ – 150% średniej wytrzymałości na ścinanie spoiny klejowej [MPa].

- Przeprowadzenie procesu montażu
Należy przeprowadzić proces montażu przy zachowaniu przyjętych parametrów geometrycznych połączenia oraz warunków konstytuowania połączenia klejowego.
- Przeprowadzenie badań wytrzymałości połączenia
Należy zaplanować i przeprowadzić badania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. Uzyskane wyniki należy poddać analizie statystycznej.

6.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Cagle Ch.V.: *Kleje i klejenie*. WNT, Warszawa 1977.
2. Ebnasajjad S.: *Adhesives Technology Handbook*. William Andrew Pub, Norwich NY 2008.
3. Ebnasajjad S. ed.: *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*. William Andrew/Elsevier, Amsterdam 2011.
4. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Fundacja „Książka Naukowo-Techniczna”, Warszawa 2002.
5. Jasiulek P.: *Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania*. Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno 2006.
6. Rudawska A., Kuczmaszewski J.: *Klejenie blach ocynkowanych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
7. Rudawska A., Miturska I.: *Wpływ warunków utwardzania i sezonowania na wytrzymałość połączeń klejowych doczołowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 2018, s. 48–52.
8. Rudawska A.: *Oprządkowanie w technologii klejenia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
9. Rutkowski, A.: *Części maszyn*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
10. Skoć A.: *Przykłady obliczeń, zadania do rozwiązania z podstaw konstrukcji maszyn. T. 1, cz. 1, Ogólne zasady obliczeń, połączenia nierozłączne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
11. Skoć A., Spalek J., *Podstawy konstrukcji maszyn. T. 1, Obliczenia konstrukcyjne, tolerancje i pasowania, połączenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
12. <https://www.woronko-kleje.pl/>

7. Regeneracja elementów maszyn za pomocą polimerowych mas regeneracyjnych

Regeneracja elementów maszyn za pomocą klejących mas regeneracyjnych jest nowoczesną technologią stosowaną podczas napraw maszyn i urządzeń. Naprawy tego rodzaju są wykonywane w przemyśle rolniczym, w warunkach polowych, na poligonach wojskowych, na morzu, a także w innych sytuacjach produkcyjnych, często zastępując procesy napawania, spawania i inne. Nowoczesne masy regeneracyjne można najczęściej modyfikować, dostosowując ich właściwości do cech regenerowanych elementów. Często charakteryzują się one podatnością na obróbkę, co ułatwia proces regeneracji [6]. W regeneracji elementów maszyn, realizowanej przy użyciu klejowych mas regeneracyjnych, kluczową rolę odgrywają zjawiska podobne jak w procesie klejenia. Głównymi pojęciami występującymi w opisie procesu regeneracji polimerowymi masami regeneracyjnymi są:

Adhezja to zjawisko powierzchniowe prowadzące do powstania nowego układu – połączenia adhezyjnego z kompleksem szczególnych charakterystyk określonych właściwościami kleju i materiałów łączonych oraz występowaniem granicy rozdziału między nimi. W literaturze przedmiotu, często nawet specjalistycznej, istnieje wiele sprzeczności terminologicznych. Pod pojęciem adhezji czasem rozumie się energię, niekiedy wytrzymałość, używa się także pojęcia „siła adhezji”.

Adhezję zwykle rozpatruje się w dwóch zasadniczych układach:

- ciało stałe – ciecz – układ prowadzący do powstania złącza adhezyjnego, a więc miejsca szczytowania dwóch materiałów,
- ciało stałe – ciecz – ciało stałe – układ prowadzący do powstania połączenia adhezyjnego; takie połączenie składa się z dwóch złączy, a warstwa utwardzonego materiału adhezyjnego pełni rolę łącznika.

Kohezja oznacza wewnętrzną spoiłość, jaką materiał, w rozpatrywanym przypadku klej, uzyskuje w wyniku różnych procesów fizykochemicznych zachodzących w procesie utwardzania.

Klej jest substancją organiczną lub nieorganiczną zdolną do trwałego łączenia materiałów w wyniku różnych zjawisk fizycznych lub fizykochemicznych zachodzących na granicy faz klej – materiał łączony (adhezja) oraz w masie kleju (kohezja). Kleje mogą być jedno- i wieloskładnikowe. W składzie masy klejącej obok składnika podstawowego mogą znajdować się utwardzacze (dla klejów chemoutwardzalnych), rozpuszczalniki i rozcieńczalniki, środki tiksotropujące, barwniki, antyutleniające, napelniacze, antystatyki, zmiękczacze, stabilizatory i inne [1, 5].

Utwardzacz to substancja, która wprowadzona do polimeru wchodzi z nim w reakcję chemiczną, prowadząc w konsekwencji do nadania substancji stanu stałego.

Rozpuszczalnik jest cieczą zdolną do rozpuszczania innych ciał, czyli tworzenia z nimi układu homogenicznego – jednorodnej mieszaniny.

Rozcieńczalnik jest to ciecz rozrzedzająca roztwór substancji, nie wykazuje zdolności rozpuszczania.

Stabilizatory to związki, które spowalniają reakcje zachodzące w procesach starzenia materiałów, szczególnie materiałów polimerowych. Dotyczy to degradacji lub destrukcji zachodzącej pod wpływem ogrzewania, promieniowania, działania wilgoci, grzybów [2] i innych czynników.

Plastyfikatory lub zmiękczacze są to ciekłe lub stałe, obojętne substancje organiczne, które oddziałują fizycznie z polimerem, powodując zmniejszenie oddziaływań międzycząsteczkowych, prowadząc w efekcie do obniżenia temperatury kruchości i zeszklenia polimerów, temperatury mięknięcia, twardości i wytrzymałości na rozciąganie przy jednoczesnym zwiększeniu elastyczności [3].

Napelniacze i nośniki są to środki pomocnicze służące do modyfikacji właściwości polimeru. Są to materiały pochodzenia naturalnego lub syntetycznego, wprowadzone do polimeru jako osnowa tworzą z nią odpowiedni kompozyt o zmienionych właściwościach.

Antystatyki są to środki będące dobrymi przewodnikami prądu elektrycznego, które stosuje się w celu ograniczenia lub wyeliminowania możliwości elektryzowania się produktów. Ich działanie polega na zmniejszeniu liczby ładunków gromadzących się na powierzchniach.

Środki tiksotropujące są to substancje wprowadzane do polimerów w celu nadania im właściwości tiksotropowych. Ich działanie polega na tym, że klej w stanie spoczynku wykazuje większą lepkość niż podczas mieszania lub wstrząsania [2].

Rozdzielacze (środki przeciwprzyczepne) są to substancje, które wprowadzane do masy polimeru lub na jego powierzchnię zapobiegają przyklejaniu się tworzywa do form i urządzeń przetwórczych, w wielu przypadkach mogą także zapobiegać procesom korozji.

Antypireny są to substancje zmniejszające palność. Są one zdolne wywołać efekt samogaśnięcia poprzez wydzielanie dużej ilości gazów niepalnych.

7.1. Pojęcia związane z regeneracją

Weryfikacją w procesie naprawczym określa się zespół czynności mających na celu badanie i ocenę stopnia uszkodzenia lub zużycia przedmiotu. Z weryfikacją nierozzerwalnie łączy się kwalifikacja, tj. zaliczanie przedmiotów o określonym stopniu uszkodzenia lub zużycia do odpowiedniej grupy przedmiotów. Z kwalifikacją ściśle wiąże się wybór sposobu naprawy, tj. wybór spośród: klejenia, kitowania, klejenia połączonego z kitowaniem, klejenia z laminowaniem połączonego z kitowaniem i innych możliwości [6].

Uszkodzone lub zużyte przedmioty dzieli się na trzy grupy:

1. Przedmioty, które mogą być w dalszym ciągu eksploatowane bez przeprowadzenia operacji naprawczych (regeneracyjnych), tzw. przedmioty z uszkodzeniem lub zużyciem dopuszczalnym.
2. Przedmioty zakwalifikowane do naprawy (regeneracji), tzw. przedmioty z uszkodzeniem lub zużyciem granicznym.
3. Przedmioty, którym nie można przywrócić wartości użytkowej, z przyczyn technicznych, ekonomicznych, bądź jednych i drugich, tzw. przedmioty przeznaczone do utylizacji.

Zaliczanie przedmiotów uszkodzonych lub zużytych do jednej z trzech wymienionych grup przeprowadza się na podstawie weryfikacji. Określenie stopnia uszkodzenia lub zużycia przedmiotów jest jednym z ważniejszych i trudniejszych zagadnień w naprawie maszyn. Można je przeprowadzać dwiema metodami: obliczeniową i statystyczno-eksploatacyjną [4].

W niektórych przypadkach zaliczenie przedmiotu do jednej z trzech grup jest zupełnie oczywiste i nie wymaga stosowania metod weryfikacji. Sytuacja taka występuje najczęściej, gdy uszkodzenie lub zużycie przedmiotu są bardzo małe lub bardzo duże. W pierwszym przypadku nie ma na ogół wątpliwości co do celowości naprawy, a w drugim – co do przeznaczenia do utylizacji.

Metoda obliczeniowa

Metoda ta polega na przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń, głównie związanych z wytrzymałością, zużyciem i niezawodnością badanych elementów. Ponieważ rodzaje uszkodzeń i zużycia znacznie różnią się kształtem, rozmiarami i umiejscowieniem na przedmiotach, jak również strukturą – nawet w grupie tych samych przedmiotów – należałoby dla każdego przypadku wykonywać złożone obliczenia. Aby przeprowadzić praktyczne obliczenia tego rodzaju, należy posiadać wiele danych wejściowych, przede wszystkim: warunki pracy naprawianego przedmiotu, rodzaj i wartość naprężeń oraz sił występujących w miejscu uszkodzenia lub zużycia oraz warunki pracy elementów klejonych, zwłaszcza dopuszczalne graniczne warunki pracy (połączeń klejowych oraz uzupełnień i wypełnień kitowych). Obliczenia takie można wykonywać za pomocą programu wspomagającego obliczenia inżynierskie, korzystając z metody elementów skończonych.

Metoda statystyczno-eksploatacyjna

W metodzie tej stosuje się statystyczne badania eksploatacyjne przedmiotów naprawianych eksperymentalnie. Metoda ta obejmuje następujące fazy:

1. Wykonanie uproszczonych obliczeń, głównie wytrzymałościowych i zużyciowych.
2. Naprawa eksperymentalna uszkodzonych lub zużytych przedmiotów według sposobu naprawy przyjętego na podstawie przeprowadzonych obliczeń i stopnia znajomości warunków pracy elementów.

3. Badania eksploatacyjne naprawionych przedmiotów w normalnych warunkach eksploatacji lub w warunkach powodujących przyspieszone zużycie, polegające głównie na okresowym sprawdzaniu stanu przedmiotów będących w fazie eksploatacji.

Na podstawie prowadzonej dokumentacji dotyczącej obliczeń, sposobu naprawy i badań eksploatacyjnych oraz wyniku tych badań określa się, czy w danych warunkach przedmioty o określonym uszkodzeniu lub zużyciu można naprawiać zgodnie z zastosowanym sposobem naprawy.

Zwykle nie przeprowadza się eksperymentalnej naprawy pojedynczych przedmiotów, lecz całych ich serii i eksploatuje się je w różnych warunkach. Otrzymuje się w ten sposób dane statystyczne. Główną zaletą tej metody jest duża pewność uzyskanych wyników, a wadą długi czas, jaki mija od przeprowadzenia eksperymentalnej naprawy do uzyskania wyników.

7.2. Zalety i wady regeneracji za pomocą materiałów adhezyjnych

Do zalet regeneracji z zastosowaniem materiałów adhezyjnych zaliczyć można [6]:

- małe koszty w stosunku do innych, porównywalnych sposobów naprawy,
- możliwość przeprowadzenia naprawy bez demontażu lub przy częściowym demontażu naprawianego elementu,
- unikanie naprężeń powstających podczas innych metod regeneracji, np. spawania,
- możliwość przeprowadzenia naprawy w miejscu wystąpienia awarii,
- prosta, niewymagająca stosowania specjalistycznego oprzyrządowania technologia,
- bardzo dobra szczelność połączeń i wypełnień,
- estetyczny wygląd naprawionych miejsc,
- bardzo dobra odporność na erozję i korozję przewyższająca odporność materiału rodzimego.

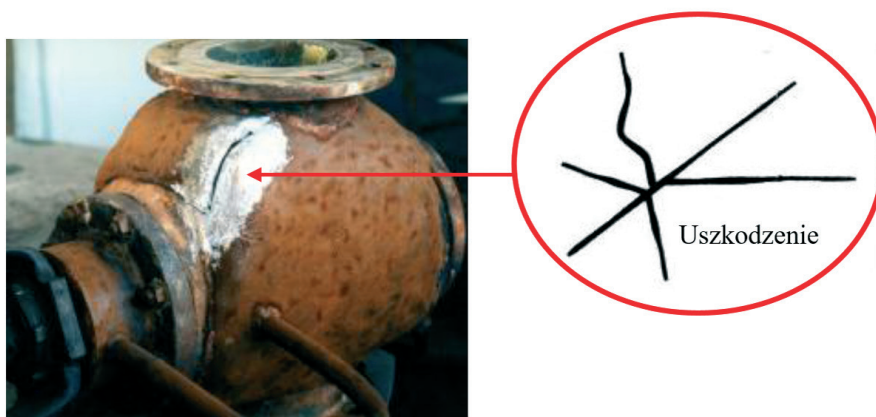
Regeneracja z wykorzystaniem materiałów adhezyjnych cechuje się jednak pewnymi wadami i ograniczeniami, wśród których wyróżnić można:

- konieczność odpowiedniego, dokładnego przygotowania powierzchni,
- trudność w identyfikacji ukrytych uszkodzeń (pęknięć, mikrouszkodzeń),
- ograniczenia wytrzymałościowe, gdyż regeneracja za pomocą materiałów adhezyjnych może nie zawsze przywrócić pełną wytrzymałość materiału, zwłaszcza w przypadku materiałów poddawanych dużym obciążeniom lub wystawionym na oddziaływanie czynników środowiskowych,
- stosunkowo długi czas utwardzania,
- wrażliwość na warunki środowiskowe.

7.3. Technologia wykonania napraw typowych uszkodzeń elementów maszyn

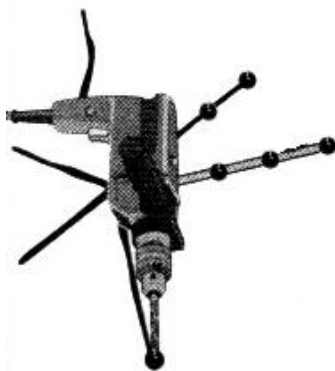
7.3.1. Naprawa pękniętego korpusu

Stosując materiały adhezyjne, można naprawiać pęknięcia we wszelkiego rodzaju metalowych obudowach, blokach, korpusach, zbiornikach. Typowe przykłady to: bloki silników spalinowych, obudowy silników elektrycznych, korpusy pomp, zaworów, zasuw, obudowy skrzyń przekładniowych, zbiorniki do przechowywania chemikaliów, oleju itp.



Rys. 7.1. Wygląd przykładowego pęknięcia w korpusie maszyny

Pierwszą czynnością regeneracji typowych uszkodzeń elementów maszyn i urządzeń za pomocą materiałów adhezyjnych jest dokładne oczyszczenie i odtłuszczenie naprawianego miejsca za pomocą preparatu czyszczącego. Dotyczy to zarówno miejsca samego pęknięcia, jak i miejsc sąsiadujących. Należy zlikwidować wszelkie przecieki. Korpusy żeliwne pracujące w oleju, o ile to możliwe, należy wypalić opalarką lub palnikiem acetylenowo-tlenowym w celu usunięcia z mikroporów cząstek oleju, które mogłyby wtórnie zanieczyścić naprawiane miejsce. Na końcach pęknięcia należy wykonać otwory stabilizujące o średnicy większej o ok. 5 mm (rys. 7.2) od szerokości szczeliny. Jeśli występują trudności ze zlokalizowaniem końców pęknięcia, można posłużyć się specjalnymi preparatami wskaźnikowymi. W pęknięciach włosowych powinny być nawiercone otwory o średnicy 5 mm. Po wykonaniu tych otworów pęknięcie nie powinno się powiększać. Podobne otwory należy wykonać na całej długości pęknięcia co ok. 50 mm (w zależności od rozmiarów pęknięć).



Rys. 7.2. Nawiercanie pęknięcia

Wszystkie otwory należy nagwintować i w celu zabezpieczenia wkręcić w nie pokryte klejem anaerobowo śruby (beztlenowo). Łby śrub należy usunąć. Wcześniej można dokonać nacięcia śrub, aby ułatwić ich zerwanie po dokręceniu, jednak należy mieć na względzie, że jeśli śruby mają duże średnice, może to być utrudnione, a dodatkowo można doprowadzić do zerwania gwintu.

Przy użyciu tarcz ściernych lub frezów kształtowych należy wykonać zukosowanie odcinków pęknięcia pomiędzy wkręconymi śrubami i dokonać schropowacenia powierzchni ok. 25 mm z każdej ze stron. Zukosowanie powinno przybrać kształt litery „V” i mieć głębokość około połowy grubości naprawianej ścianki.



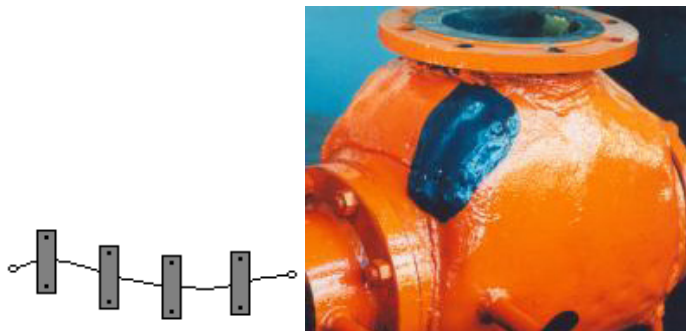
Rys. 7.3. Ukosowanie i chropowacenie dużego pęknięcia w zbiorniku

Jeśli w wyniku powyższych czynności uszkodzone miejsca uległy zatłuszczeniu, operację odtłuszczenia należy powtórzyć. Po powtórnym odtłuszczeniu i wysuszeniu naprawianej części następuje aplikacja dokładnie klejowej masy regeneracyjnej. W tego typu czynnościach stosuje się produkty tiksotropowe. Naprawę elementów narażonych na zużycie erozyjne wykonuje się produktami przeznaczonymi do tego celu.

Za pomocą szpachelki nakłada się warstwę produktu tak, aby całkowicie wypełnić nim na wskroś pęknięcie, zukosowanie i warstwą ok. 1 mm pokryć powierzchnie schropowane. Następnie na pęknięcie nakłada się taśmę (siatkę) wzmacniającą o wymiarach nieznacznie mniejszych od powierzchni schropowanej i dokładnie wciera się w nią adhezyjny materiał regeneracyjny. Materiał regeneracyjny można wetrzeć wcześniej w przycięty kawałek taśmy położony na równej, gładkiej powierzchni, np. twardej folii. Przyłożoną do pęknięcia taśmę pokrywa się warstwą kompozytu o grubości około 5 mm. Na brzegach taśmy grubość warstwy powinna się zmniejszać i wynosić około 1,5 mm w odległości 5 mm od jej brzegów.

W przypadku naprawy pęknięcia włosowatego o szerokości równej lub mniejszej od 0,05 mm przed nałożeniem kompozytu należy zaaplikować w szczelinę kapilarny klej anaerobowy.

Jeśli w pęknięciu występują naprężenia rozciągające lub nastąpiło naruszenie stabilności obudowy, zamiast wykonywania otworów i wkręcania w nie śrub należy dokonać wzmocnienia i stabilizacji za pomocą klamer z blachy o grubości około połowy grubości ścianki, jednak nie mniejszej niż 2 mm. Klamry montuje się na cienką warstwę materiału kompozytowego i mocuje śrubami. Powierzchnie klamer powinny być odtłuszczone i schropowane. Taśmę wzmacniającą nakłada się na klamry z uwzględnieniem wcześniej podanych zaleceń.



Rys. 7.4. Naprawa korpusu za pomocą taśm i klamer

Naprawione podzespoły można włączyć do eksploatacji po ok. 24 godzinach (w 20°C). Aby zwiększyć wytrzymałość naprawianych miejsc, można wygrzać je w temperaturze 80–100°C przez okres 2–4 godzin, jednak z uwagi na różne czasy sieciowania mas regeneracyjnych należy zawsze sprawdzić parametry utwardzania w karcie informacyjnej produktu regeneracyjnego.

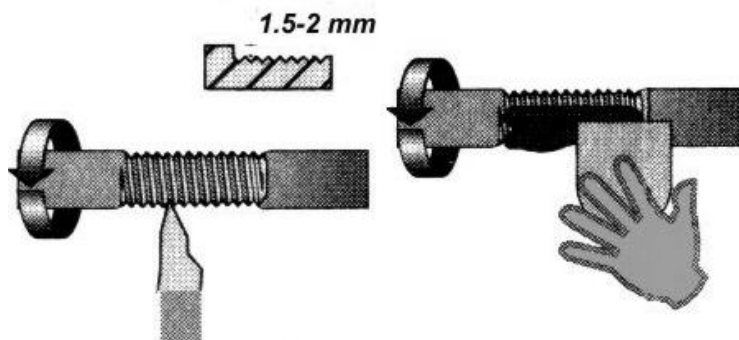
7.3.2. Naprawa uszkodzonego czopu na wale pod łożysko toczne

Regenerację powierzchni, na których osadzone są łożyska toczne, można przeprowadzić za pomocą jednego z poniższych rozwiązań:

- w mechanizmach wolnoobrotowych, gdzie akceptowalne są stosunkowo duże odchyłki współosiowości i nie jest wymagana duża dokładność odtworzenia kształtu powierzchni, regenerację uszkodzonej lub zużytej powierzchni można przeprowadzić metodą „na gotowo” z odwzorowaniem powierzchni przez zewnętrzną powierzchnię łożyska lub przez półtuleje wykonywane dla określonej średnicy wału. Zaletą tej metody jest brak konieczności demontażu elementów regenerowanych oraz możliwość pominięcia operacji obróbki skrawaniem.
- w pozostałych przypadkach stosuje się metodę z końcową obróbką skrawaniem. Do napraw tego typu najczęściej wykorzystuje się masy regeneracyjne. W regeneracjach dużych elementów obróbką skrawaniem stosuje się środki podatne na obróbkę ubytkową.

Metoda obróbką skrawaniem

Naprawianą powierzchnię wału należy bardzo dokładnie odłuszczyć, np. przy użyciu preparatu oczyszczającego. Następnie wał należy umocować w uchwycie tokarki. Uszkodzony czop należy przetoczyć (zdjąć wierzchnią warstwę materiału) i naciąć linię śrubową tak, aby po obróbce grubość nałożonej warstwy wynosiła minimum 1,5–2 mm (rys. 7.5).



Rys. 7.5. Przygotowanie czopu wału do regeneracji poprzez nacinanie gwintu oraz nanoszenie masy regeneracyjnej

Po zakończonym procesie skrawania należy powtórzyć odłuszczenie regenerowanej powierzchni. Na tak przygotowaną suchą powierzchnię czopa nakłada się przy użyciu szpachelki cienką warstwę dokładnie wymieszanej masy regeneracyjnej. Pierwsza warstwa musi być dokładnie wtarta w regenerowaną powierzchnię. Nakładając materiał, należy przewidzieć niewielki naddatek na obróbkę. Najwygodniej jest aplikować materiał na wale zamontowanym na tokarce przy prędkości obwodowej około 0,2–0,3 m/s.



Rys. 7.6. Aplikacja masy regeneracyjnej na czop wału

Po utwardzeniu masy możliwa jest dalsza obróbka skrawaniem po czasie około 3,5–4 godzin podczas sezonowania w temperaturze 20°C.



Rys. 7.7. Zregenerowany czop wału oraz jego obróbka skrawaniem na żądany wymiar

Po utwardzeniu wał należy obrabiać na zadany wymiar toczeniem lub szlifowaniem.

W celu zwiększenia właściwości mechanicznych naniesionej powłoki można wygrzać ją w temperaturze 80–100°C przez okres 2–4 godzin. Na tak przygotowaną powierzchnię można zamontować łożysko. Aby uzyskać pewność, że łożysko nie będzie się obracać na czopie, należy połączyć je z powierzchnią czopu za pomocą kleju anaerobowo-stykowego.

Metoda z odwzorowaniem powierzchni

Naprawianą część wału należy starannie odłuszczyć przy użyciu preparatu czyszczącego, a następnie zeszlifować i schropowacić mechanicznie zużyta powierzchnię (tarczą korundową) (rys. 7.8). Średnica naprawianej części wału po zeszlifowaniu powinna być mniejsza o minimum 3 mm od miejsc nieuszkodzonych, które będą stanowiły bazę do dalszych operacji naprawczych. Uszkodzoną powierzchnię należy przeszlifować tak, aby powstała ostra granica (próg) pomiędzy częścią uszkodzoną a nieuszkodzoną wału.



Rys. 7.8. Przygotowanie czopu wału do regeneracji

Po nałożeniu wymieszanego materiału regeneracyjnego (z niewielkim naddatkiem) na naprawiany odcinek wału nakłada się posmarowane środkiem o działaniu separacyjnym półtuleje i ściska je opaskami lub skręca śrubami (w zależności od konstrukcji).



Rys. 7.9. Naprawa wału metodą odwzorowania powierzchni

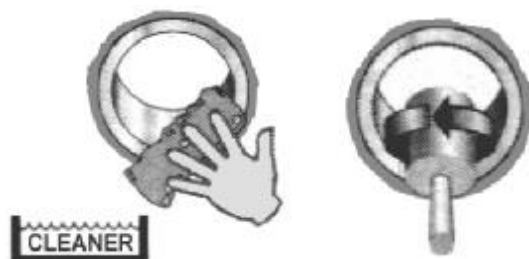
Półtuleje (o średnicy wewnętrznej równej nominalnej średnicy wału) muszą być wykonane dla konkretnego wału, z niepełnym zarysem obwodu, tak aby była możliwość wyciśnięcia na zewnątrz nadmiaru materiału. Aby wykorzystać nieuszkodzone części wału jako bazę, ich długość musi być większa o ok. 25% od naprawianego odcinka wału.

Ponieważ materiał regeneracyjny nakłada się z niewielkim naddatkiem po nałożeniu półtulei i ich ściśnięciu nadmiar materiału może dostać się pomiędzy półtuleje i bazowe powierzchnie wału (rys. 7.9). Aby temu zapobiec, nie należy nakładać materiału kompozytowego przy powierzchniach bazowych. Ewentualne braki można uzupełnić po zdjęciu półtulei po 3–6 godzin od nałożenia. Również po takim czasie można usunąć wypływki, które powstaną pomiędzy krawędziami półtulei. W celu poprawy parametrów mechanicznych naniesionej powłoki można wygrzać ją w temperaturze 80–100°C przez okres 2–4 godzin.

7.3.3. Naprawa otworów gwintów wewnętrznych

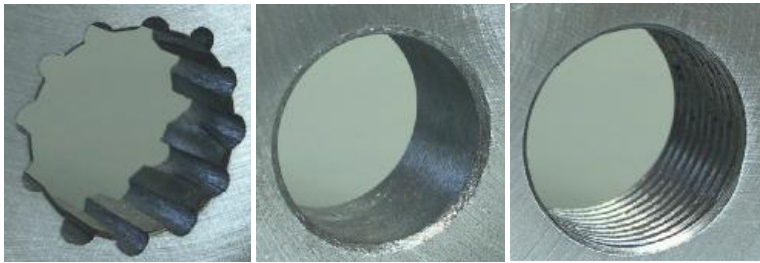
Do uszkodzeń gwintów wewnętrznych zalicza się przede wszystkim zerwanie gwintu lub bardziej rozległe zniszczenia, często całej powierzchni nagwintowanej. Naprawa tego typu uszkodzeń polega na odtworzeniu połączenia śrubowego przez odwzorowanie gwintu wewnętrznego.

Pierwszą czynnością jest bardzo dokładne umycie i odtłuszczenie powierzchni otworu preparatem czyszczącym. Następnie za pomocą wiertarki lub szlifierki należy powiększyć otwór (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Oczyszczanie i powiększanie otworu gwintowanego przed naprawą

Na powierzchniach otworów wykonuje się nacięcia lub przeprowadza operację chropowacenia powierzchni. Uszkodzony otwór można również rozwiertić i naciąć pomocniczy gwint o dużym skoku (rys. 7.11).



Rys. 7.11. Sposoby przygotowania powierzchni otworu

Po usunięciu opiłków z powierzchni otworu w powierzchnię naprawianą wciera się dokładnie wymieszaną masę regeneracyjną. Nową lub nieuszkodzoną śrubę (lub element z gwintem zewnętrznym) smaruje się separatorem, a następnie pokrywa materiałem regeneracyjnym. Przygotowaną w ten sposób śrubę wprowadza się do otworu, delikatnie obracając, tak aby całkowicie wypełnić materiałem kompozytowym wolną przestrzeń pomiędzy śrubą a otworem.

Po całkowitym utwardzeniu materiału kompozytowego (po 24 godzinach sezonowania w temperaturze 20°C) śrubę można wykręcić. W otworze pozostanie gwint powstały przez odwzorowanie nieuszkodzonego (z pełnym zarysem) gwintu zewnętrznego śruby.

Jeśli połączenie może być nierozłączne, śrubę przed nałożeniem materiału kompozytowego należy odłuszczyć i nie smarować separatorem. Tak otrzymane połączenie będzie cechowało się większą wytrzymałością. Ewentualny demontaż należy wykonywać po podgrzaniu połączenia.

7.4. Przebieg ćwiczenia

7.4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z operacją regeneracji za pomocą klejących mas regeneracyjnych. Celem ćwiczenia jest także praktyczne wykonanie przykładowej naprawy za pomocą regeneracyjnych mas polimerowych oraz porównanie wytrzymałości elementu poddanego regeneracji z elementem nieuszkodzonym.

7.4.2. Program realizacji ćwiczenia

- Na podstawie analizy przedstawionej w punkcie 7.2 zaproponować technologię regeneracji otrzymanych próbek.
- Przygotować powierzchnię poddawaną regeneracji zgodnie z zaproponowaną technologią, pamiętając, że:

- powierzchnię części przeznaczoną do naprawy należy odtłuścić chemicznie lub palnikiem gazowym i oczyścić mechanicznie – przez śrutowanie, piaskowanie lub przy użyciu szlifierek kątowych, trzpieniowych ściernic, papieru ściernego itp.,
- zawsze należy dążyć do dokładnego usunięcia zanieczyszczeń i nadania dużej chropowatości powierzchni. Prawidłowo przygotowaną powierzchnię należy odtłuścić powtórnie, używając odpowiedniego preparatu odtłuszczającego.
- Zgodnie z zaproponowaną technologią przygotować masę regeneracyjną. Przygotowanie to może polegać na wymieszaniu celem ujednorodnienia, dodaniu modyfikatora i wymieszaniu, dodaniu utwardzacza i wymieszaniu.
- Do pobrania bazy i utwardzacza najlepiej używać dwóch różnych łopatek. Oba składniki należy mieszać na równej gładkiej powierzchni (nie mieszać w opakowaniach) do uzyskania jednolitej barwy. Należy dążyć do aplikacji zaraz po przygotowaniu mieszaniny, gdyż reakcja utwardzania zaczyna się natychmiast i każde opóźnienie osłabia adhezję. Potrzebną do położenia warstwę najlepiej jest nakładać jednorazowo, dokładnie wcierając w podłoże.
- W razie konieczności nałożenia drugiej warstwy pierwsza nie może być całkowicie utwardzona – w innym przypadku należy schropowacić powierzchnię. Przy naprawie pęknięć wskazane jest dodatkowe wzmocnienie kompozytu siatką stalową lub z włókna szklanego.
- W razie konieczności zastosować stabilizację cieplną (wygrzewanie w temperaturze 80–90°C w czasie minimum 2 h, po wstępnym utwardzeniu, co w istotny sposób poprawi wartości parametrów wytrzymałościowych).
- Przygotowaną masę regeneracyjną rozprowadzić zgodnie z opracowaną technologią. Zwrócić uwagę na dokładne rozprowadzenie masy, aby nie powstały znacznych rozmiarów niedoklejenia. Nadmiar masy usunąć.
- Regenerowany przedmiot z nałożoną masą regeneracyjną poddać procesowi sezonowania zgodnie z opracowaną technologią.
- Przedmiot poddać obróbce wykańczającej do uzyskania założonych wymiarów i jakości powierzchni.
- Po okresie sezonowania należy poddać wykonane połączenia badaniom wytrzymałościowym. Podczas badań należy zwrócić uwagę na odpowiednie i powtarzalne mocowanie próbek.
- Próbkę należy mocować w szczękach uchwytu zrywarki we właściwej kolejności. Najpierw należy zamocować próbkę w szczęce ruchomej poprzez dokręcenie pokrętłem, a następnie zamocować i dokręcić szczękę uchwytu stałego (dolnego). Należy mocować próbki w tej samej odległości, utrzymując jednakową odległość między uchwytami zrywarki oraz stałą odległość w próbach między środkiem łączonych próbek a dolną szczęką. Do pomiaru odległości użyć suwmiarki.

- Przeprowadzić pomiary średnicy otworu i średnicy wałka dla przekazanej partii elementów lub wygenerować wyniki pomiarów w programie – postępować zgodnie z zaleceniami prowadzącego ćwiczenia.
- Uzyskane wyniki poddać analizie.

7.5.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

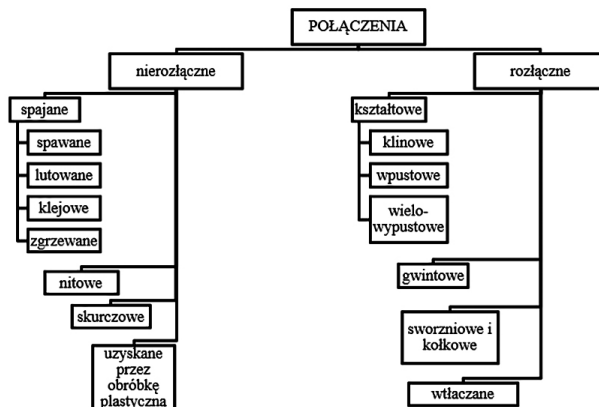
1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Cagle Ch.V.: *Kleje i klejenie*. WNT, Warszawa 1977.
2. Cognard P. ed.: *Handbook of Adhesives and Sealants*. Elsevier, Boston 2006.
3. Ebnesajjad S.: *Adhesives Technology Handbook*. William Andrew Pub., Norwich NY 2008.
4. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Fundacja „Książka Naukowo-Techniczna”, Warszawa 2002.
5. Rudawska A.: *Oprządkowanie w technologii klejenia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
6. Rudawska A., Wierzchowski A., Müller M., Petru J., Náprstková N.: *The Properties of Regenerative Polymer Mass*. „Advances in Science and Technology Research Journal” 2017, 11, s. 130–138.

8. Połączenia nitowe

W procesie technologicznym montażu różnych maszyn i urządzeń występuje wiele połączeń rozłącznych i nierozłącznych, których rodzaje przedstawiono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Rodzaje połączeń montażowych

Połączenia konstrukcyjne nierozłączne są to połączenia, w których podczas rozłączania następuje zniszczenie lub uszkodzenie elementów łączonych lub łączników.

Połączenia konstrukcyjne rozłączne są to połączenia, które umożliwiają wielokrotne łączenie i rozłączanie elementów konstrukcyjnych bez ich uszkodzenia.

Ze względu na sposób powiązania elementów połączenia konstrukcyjne można podzielić na:

- bezpośrednie – połączenia, w których elementy są ze sobą połączone bez elementów pomocniczych,
- pośrednie – połączenia, w których stosuje się dodatkowe elementy – łączniki, np. śruby, nity, kołki.

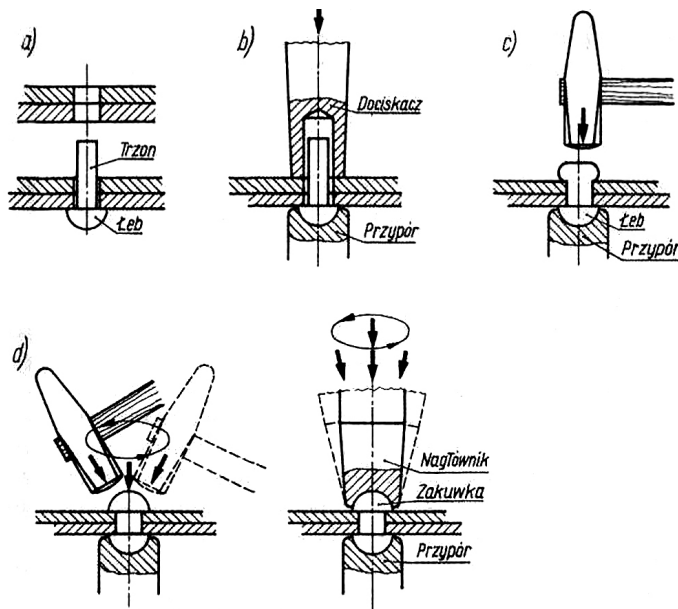
8.1. Nitowanie

Nitowanie jest to łączenie elementów za pomocą nitów. Nitowanie ma na celu wykonanie trwałego, mocnego i szczelnego połączenia (blachy, zbiorników i kotłów, belek mostowych, więźarów dachowych, niektórych części maszyn itp.) lub połączeń przegubowych (połączenia dźwigniowe, części narzędzi itp.) [5]. Nitowanie może być wykonywane na zimno (stosowane przy nitach o średnicy do 10 mm, niekiedy do 20 mm) lub na gorąco (przy nitach o średnicy powyżej 10 mm), ręcznie bądź mechanicznie. Połączenia nitowe należą do połączeń pośrednio spoczynkowych i nierozłącznych. Na zimno zamyka się nity do łączenia cienkich blach. Są to nity o średnicach $d < 9$ mm. Średnica otworu pod takie nity jest większa od średnicy trzonu nitu od 0,2

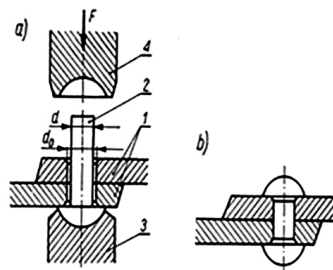
do 0,5 mm. Luz większy odpowiada większej średnicy trzonu. Nity o średnicach trzonu $d > 9$ mm zamyka się na gorąco. Średnica otworu nitowego jest większa od średnicy trzonu $d > 10$ mm dla ułatwienia włożenia weń rozgrzanego nitu [1].

Wykonanie połączenia nitowego polega na wycięciu stemplem lub wywierceniu otworów nitowych w elementach łączonych, wstawieniu nitu w otwory montażowe i jego zamknięciu, tj. wykonaniu drugiego łba (tzw. *zakuwki*).

Proces nitowania przebiega zwykle w następujący sposób: do otworów łączonych części zakłada się nit (rys. 8.2a), którego łeb opiera się o przypór. Po oparciu łba nitu na przyporze nakłada się dociskacz (rys. 8.2b) i mocnymi uderzeniami młotka w łeb dociskacza dociska się blachy nitowane do siebie. Po zdjęciu dociskacza uderzeniami młotka kształtuje się zakuwkę (rys. 8.2c) i wykańcza ją nagłówniakiem [2, 3].



Rys. 8.2. Kolejne fazy nitowania



Rys. 8.3. Wykonanie połączenia nitowego: a) zamykanie nitu, b) połączenie nitowe: 1 – części łączone, 2 – nit, 3 – wspornik, 4 – zakuwnik

Nitowanie może być wykonywane ręcznie lub mechanicznie. Zamykanie nitów może odbywać się uderzeniowo, młotkiem ręcznym lub mechanicznym (pneumatycznym lub elektrycznym) lub naciskowo za pomocą nitownic (mechanicznych, hydraulicznych, pneumatycznych lub elektrycznych) [4].

8.2. Rodzaje połączeń nitowych

W zależności od zastosowania połączenia nitowe dzieli się na: mocne, szczelne, mocno-szczelne i nieznacznie obciążone [1].

Połączenia nitowe mocne stosuje się do łączenia elementów konstrukcji stalowych przenoszących znaczne siły. Ze względu na rodzaj łączonych elementów i charakter obciążenia rozróżnia się:

- połączenia pasów blach obciążonych tylko siłami rozciągającymi,
- połączenia kształtowników w kratownicach obciążonych siłami rozciągającymi,
- połączenia blach z kształtownikami w blachownicach.

Połączenia nitowe szczelne stosuje się głównie w zbiornikach otwartych, przewodach rurowych, zbiornikach zamkniętych pracujących przy małych ciśnieniach.

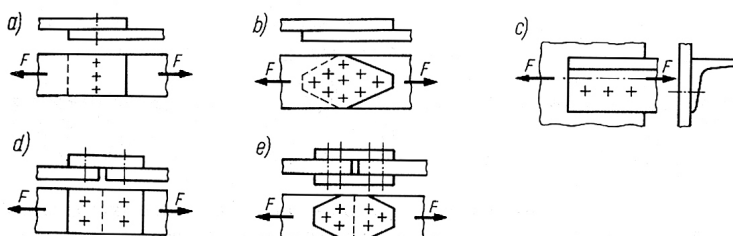
Połączenia nitowe mocno-szczelne stosuje się w zbiornikach ciśnieniowych oraz zbiornikach wielkogabarytowych. W połączeniach mocno-szczelnych stosowanych do łączenia cienkich blach (poniżej 5 mm) nitowanych na zimno wprowadza się między blachy podatne szczeliwo. Stosowanie doszczelniania krawędzi blach i łbów nitów zwiększa pewność szczelności połączenia.

Połączenia nitowe nieznacznie obciążone stosuje się w konstrukcjach o niewielkich rozmiarach.

Ze względów konstrukcyjnych połączenia nitowe dzieli się na:

- zakładkowe,
- nakładkowe.

Połączenia nitowe wykonane za pomocą szeregu nitów nazywa się szwem nitowym. W zależności od sposobu rozstawienia nitów rozróżnia się szwy nitowe jednorzędowe oraz wielorzędowe (rys. 8.4).

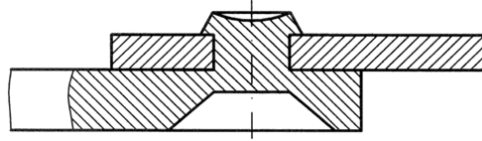


Rys. 8.4. Połączenia nitowe: a) zakładkowe – szew jednorzędowy, b), c) zakładkowe – szew wielorzędowy, d) nakładkowe jednostronne – szew jednorzędowy, e) nakładkowe dwustronne – szew dwurzędowy

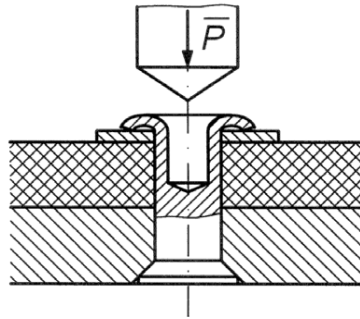
Rozstawienie nitów projektuje się w taki sposób, aby nie spowodować znacznego osłabienia blach, zapewnić dostateczną wytrzymałość połączenia w pozostałych przekrojach niebezpiecznych oraz zapewnić swobodny dostęp narzędzi (wspornika i zakuwnika) przy nitowaniu sąsiednich nitów. Najkorzystniejsze są połączenia nitowe dwunakładkowe.

Ze względu na sposób powiązania elementów połączenia nitowe można podzielić na:

- bezpośrednie (rys. 8.5),
- pośrednie (rys. 8.6).



Rys. 8.5. Połączenie nitowe bezpośrednie



Rys. 8.6. Połączenie nitowe pośrednie

Połączenie nitowe odznacza się dużymi naprężeniami wstępnymi oraz stosunkowo małą temperaturą towarzyszącą procesowi technologicznemu. W połączeniu tym nie występują naprężenia własne, co umożliwia łączenie różnych materiałów.

Do wad połączenia nitowego zalicza się jego nierozłączność, osłabienie łączonych elementów przez wiercenie otworu, trudności konstrukcyjne oraz trudności z uzyskaniem szczelności i dużą pracochłonność.

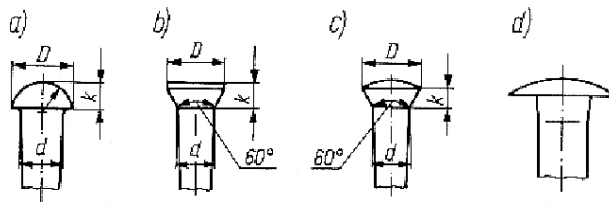
8.3. Rodzaje nitów

Nit jako część łącząca przed wykonaniem połączenia składa się z łba i trzonu, po zanitowaniu zaś z łba szyjki i zakuwki. Na nity stosuje się na ogół materiał tego samego rodzaju, co łączone części, np. części stalowe łączy się nitami stalowymi, a w przypadku łączenia różnych materiałów stosuje się materiał o większej odkształcalności. Materiał stosowany na nity powinien być plastyczny, ażeby łatwo tworzyła się zakuw-

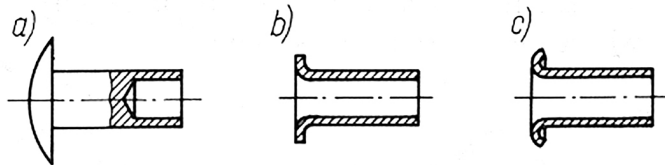
ka, bez obawy pęknięcia przy uderzeniach. Materiały najczęściej stosowane na nity to stal: St2N, St3N, St4N, stopy miedzi, mosiądz, stopy aluminium [1, 3].

Kształty i wymiary nitów ogólnego przeznaczenia zostały znormalizowane. W zależności od kształtu trzpienia rozróżnia się nity (rys. 8.7, rys. 8.8):

- pełne – stosowane do połączeń trwałych w konstrukcjach metalowych (nity z łbem kulistym, stożkowym, soczewkowym, grzybkowym, soczewkowym),
- drażnione – stosowane w konstrukcjach o niewielkich rozmiarach, m.in. w mechanice precyzyjnej i elektrotechnice,
- rurkowe – stosowane w drobnych konstrukcjach,
- specjalne – np. kałużowe okrętowe.



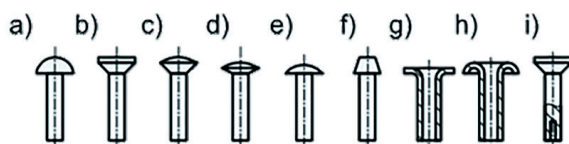
Rys. 8.7. Nity pełne z łbem: a) kulistym, b) stożkowym (płaskim), c) stożkowym soczewkowym, d) grzybkowym



Rys. 8.8. Nity: a) drażzony, b), c) rurkowe

Znormalizowane zostały następujące rodzaje nitów:

- nity z łbem kulistym (rys. 8.9a) według normy PN-70/M-82952,
- nity z łbem płaskim (rys. 8.9b) według normy PN-70/M-82954,
- nity z łbem soczewkowym zwykłym (rys. 8.9c) według normy PN-70/M-82957 i niskim (rys. 9d) według normy PN-70/M-82956,
- nity z łbem grzybkowym (rys. 8.9e) według normy PN-70/M-82958,
- nity z łbem trapezowym (rys. 8.9f) według normy PN-70/M-82959,
- nity rurkowe z łbem płaskim (rys. 8.9g) według normy PN-80/M-82972 i odwijającym (rys. 8.9h) według normy PN-80/M-82973,
- nity drażnione z łbem płaskim (rys. 8.9j) według normy PN-80/M-82974.



Rys. 8.9. Rodzaje nitów

Tabela 8.1. Zakresy średnic i długości nitów (rys. 8.9)

Nit z rysunku	8.9a	8.9b	8.9c	8.9d	8.9e	8.9f
Zakres średnic d [mm]	1–36	1–36	2–36	1,6–8	2–10	10–36
Średnice normalne d: 1; 1,2; (1,4); 1,6; 2; 2,5; 3; (3,5); 4; 5; 6; 8; 10; 12; (14); 16; (18); 20; (22); 24; (27); 30; (33) i 36 mm						
Długości normalne l: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, (11), 12, (13), 14, (15), 16, (17), 18, (19), 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 50, 52, 55, 58, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, (105), 110, (115), 120, (125), 130, (135), 140, (145), 150, (155), 160, (165), 170, (175) i 180 mm						
Średnice i długości ujęte w nawiasach są niezalecane.						

Zakresy średnic i długości nitów wymienionych zaprezentowanych na rysunku 8.9 a–f podane są w tabeli 8.1. Na wybór odpowiedniej średnicy nitu ma wpływ, poza względami wytrzymałościowymi, jeszcze warunek, aby długość nitu nie była zbyt duża w porównaniu ze średnicą, gdyż przez to unika się niebezpieczeństwa wyboczenia nitu podczas wykonywania połączenia.

8.4. Narzędzia do procesu nitowania

Wśród narzędzi stosowanych podczas wykonywania połączeń nitowych można wymienić:

- zagławiacz – do kształtowania łba nita,
- dociągacz – do dociągnięcia nita,
- narzędzia podstawowe, np. młotek itp.,
- nitownice.

Występuje wiele rodzajów nitownic, spośród których najczęściej stosowanymi są nitownice ręczne oraz pneumatyczne. Nitownice ręczne (rys. 8.10) mogą pracować w dowolnym położeniu i służą do wykonywania połączeń nitowych w konstrukcjach przestrzennych, takich jak stelaże, osłony czy obudowy.



Rys. 8.10. Przykłady nitownic ręcznych do nitów zrywalnych

Nitownice pneumatyczne (rys. 8.11) to efektywne rozwiązanie stosowane w różnego rodzaju punktach obsługi, np. okładzin hamulcowych.



Rys. 8.11. Przykłady nitownic pneumatycznych

Nitownice pneumatyczne wykorzystywane są tam, gdzie potrzebne jest dokładne, estetyczne i szybkie nitowanie okładzin hamulcowych, tarcz sprzęgieł, a nawet małych docisków sprzęgłowych.

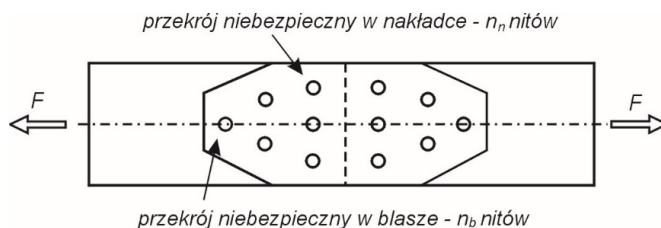
8.5. Obliczenia połączeń nitowych

Połączenia nitowe należą do grupy połączeń cierno-kształtowych, jednak w obliczeniach wytrzymałościowych pomija się tarcie występujące pomiędzy łbami nitów i łączonymi elementami oraz pomiędzy tymi elementami. Uwzględnia się natomiast możliwość zniszczenia połączenia nitowego poprzez: ścięcie nitów, nadmierny nacisk pomiędzy trzonami nitów a ściankami otworu, a także rozerwanie łączonych blach pomiędzy otworami skrajnego rzędu nitów [5, 6].

W celu uproszczenia obliczeń wytrzymałościowych połączeń nitowych przyjmuje się następujące założenia:

- obciążenie rozkłada się równomiernie na wszystkie nity (w rzeczywistości najbardziej obciążone są nity skrajne – rys. 8.14),
- wytrzymałość połączenia nitowego oblicza się, uwzględniając przypadek czystego ścinania (jeśli materiały nitu i łączonych części mają jednakową lub zbliżoną twardość, wystąpi bardziej złożony stan naprężeń),

- w połączeniach nitowanych na gorąco pomija się wpływ zmęczenia materiału, przyjmując wartość umownych dopuszczalnych naprężeń ścinających k_n zarówno przy obciążeniach statycznych, jak i zmiennych.



Rys. 8.12. Przykład dwustronnego złącza nakładkowego – niebezpieczny przekrój

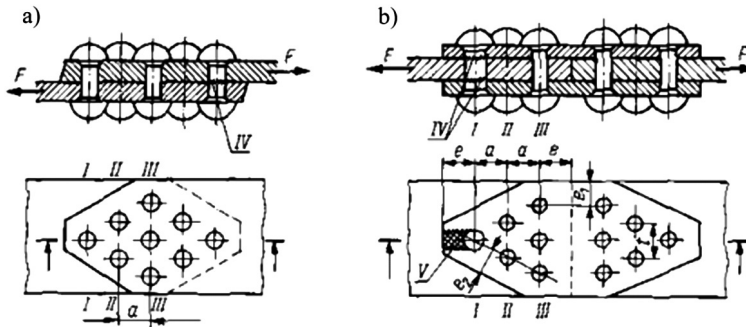
Tabela 8.2. Wartości naprężeń dopuszczalnych, stosowane przy obliczaniu połączeń nitowych (w MPa)

Materiał nitów	Nitowanie			
	Na zimno		Na gorąco	
	k_t	k_o	k_n	k_o
St0S (S185)	65	$(2-4) k_t$	90	$(2-4) k_n$
St3S (~S235JR)	75	Średnio	110	Średnio
St4N, St4S (S275)	85-90	$\sim 2,5 k_t$	125	$\sim 2,5 k_n$

Uwagi:
 k_t – dopuszczalne naprężenia ścinające (pomijane siły tarcia)
 k_n – umowne dopuszczalne naprężenia ścinające (uwzględnione siły tarcia)
 k_o – dopuszczalny nacisk powierzchniowy

Połączenia nitowe pasów blach (rys. 8.13) mogą ulec zniszczeniu wskutek:

- ścięcia nitów (w przekrojach oznaczonych IV),
- owalizacji otworów nitowych lub nitów, występującej przy nadmiernych naciskach powierzchniowych na bocznych powierzchniach walcowych (w miejscu styku nitów z blachą),
- zerwania łączonych blach lub nakładek (w przekrojach I-I, II-II, III-III),
- wyrywania nitów z blachy w wyniku ścięcia blach w przekrojach V,
- zginania blach w połączeniach zakładkowych i nakładkowych jednostronnych,
- wyboczenia prętów ściskanych,
- oderwania łbów nitów.



Rys. 8.13. Wymiary połączeń nitowych i przekroje narażone na zniszczenie: a) szew zakładkowy, b) szew dwunakładkowy, gdzie: a – odległość pomiędzy rzędami nitów, e – odległość nitu od krawędzi nakładki

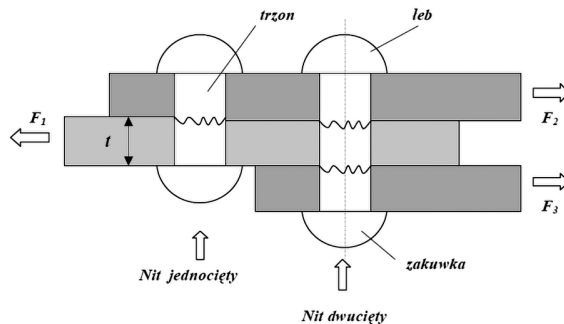
Wytrzymałość nitów oblicza się z dwóch warunków wytrzymałościowych (w przypadku połączeń nitowych mocnych) [5, 6]:

na ścinanie (rys. 8.14):

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot m \cdot n} \leq k_n \text{ (lub } k_{tn}) \quad (8.1)$$

gdzie:

- F – siła zewnętrzna (obciążenie połączenia nitowego),
- m – liczba przekrojów w jednym nicie,
- d_0 – średnica otworu nitowego (nitu zakutego),
- n – liczba nitów (w połączeniach zakładkowych – wszystkie nity, w połączeniach nakładkowych – nity łączące jeden z pasów nakładkami),
- $k_n(k_t)$ – dopuszczalne naprężenia ścinające,



Rys. 8.14. Nity jednocięte (połączenie zakładkowe) i dwucięte (połączenia nakładkowe)

- na naciski powierzchniowe:

$$p = \frac{F}{n \cdot g \cdot d_o} \leq k_o \quad (8.2)$$

gdzie:

n – liczba nitów

- na rozrywanie blach:

$$\sigma = \frac{F}{A} < k_r \quad (8.3)$$

gdzie:

$A = (b - d) \cdot g$ – dla blachy środkowej,

$A = 2g \cdot (b - 2 \cdot d)$ – dla nakładek,

b – szerokość połączenia.

Warunek wytrzymałościowy, ze względu na ścinanie trzonu nitu, ma postać:

$$\tau_t = \frac{4F_n}{\pi d^2 m} \leq k_t = 0,65k_r \quad (8.4)$$

gdzie:

F_n – siła działająca na pojedynczy nit,

d – średnica trzonu nitu,

m – liczba ścinanych przekrojów ($m = 1$ dla nitów jednoczętych,

$m = 2$ dla nitów dwuczętych).

Ze względu na nacisk obliczenia są prowadzone przy założeniu, że siła dociskająca nit do ścianki otworu działa na powierzchnię rzutu trzonu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku jej działania. Tak więc warunek wytrzymałościowy ma postać:

$$\sigma_d = \frac{F_n}{t_d} \leq k_d \quad (8.5)$$

gdzie:

t_d – grubość blach,

F_n – siła działająca na pojedynczy nit,

k_d – dopuszczalny nacisk.

Należy zauważyć, że w przypadku różnej grubości łączonych elementów (blach) nacisk należy obliczać dla t_{min} . Wartość dopuszczalną nacisku k_d przyjmuje się z wzoru:

$$k_d = 1,25 \cdot \frac{R_e}{\gamma_s} \quad (8.6)$$

w którym:

R_e – granica plastyczności,

γ_s – współczynnik zależny od wartości R_e ,

($\gamma_s = 1,15$ dla R_e 360 MPa, $\gamma_s = 1,2$ dla 360 R_e 470 MPa,

= 1,25 dla 470 R_e 600 MPa).

Warunek wytrzymałości na rozciąganie łączonych blach w przekroju osłabionym otworami na nity w połączeniu zakładkowym ma postać:

$$\sigma_r = \frac{F}{(b-nd)t} \leq k_r \quad (8.7)$$

gdzie:

- t – grubość blach,
- n – liczba nitów o średnicy d , w skrajnym rzędzie nitów (przekrój najbardziej narażony na rozerwanie),
- F – siła działająca na połączenie.

W przypadku połączenia nakładkowego dwustronnego (rys. 8.12) warunek (8.7) uwzględnia fakt, że najbardziej obciążonym jest rząd o nakładce o grubości t_n , położony najbliżej środka połączenia:

$$\sigma_r = \frac{F}{2(b-nd)t_n} \leq k_r \quad (8.8)$$

gdzie:

- t_n – grubość nakładki,
- F – siła działająca na połączenie,
- b – szerokość połączenia,
- d – średnica nitów,
- n – liczba nitów,
- k_r – dopuszczalne naprężenia rozciągające.

Grubość nakładki powinna zostać dobrana tak, aby nośność łączonych blach była taka sama jak nośność nakładek, co w praktyce oznacza równość przekrojów blachy i obu nakładek w przekrojach niebezpiecznych (rys. 8.14):

$$(b - n_b d) t = 2 (b - n_n d) t_n \quad (8.9)$$

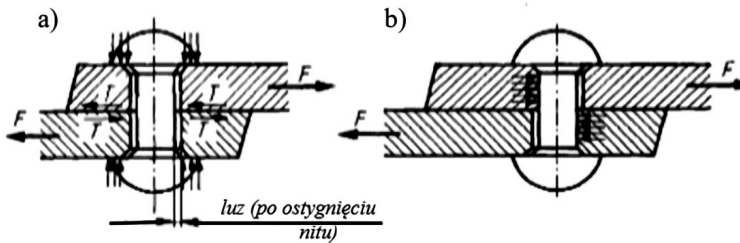
gdzie:

- b – szerokość połączenia,
- n_b – liczba nitów w przekroju blachy,
- d – średnica nitów,
- t – grubość blach,
- n_n – liczba nitów w przekroju nakładki,
- t_n – grubość nakładki.

Powyższa równość umożliwia wyznaczenie grubości nakładek. Podczas wykonywania zakuwki części łączone są do siebie dociskane, przy czym wartość siły docisku zależy od sposobu nitowania.

Przy zamykaniu nitów na gorąco w momencie zakończenia nitowania nity są nagrzane do temperatury powyżej 500°C. W wyniku skurczu wzdłużnego podczas

stygnięcia nitu w jego trzonie powstają naprężenia rozciągające, wywołujące silny docisk blach przez łeb i zakuwkę nitu. Jednocześnie wskutek skurczu poprzecznego między otworami w blachach a nitem powstaje niewielki luz. Po obciążeniu złącza siłą F między blachami powstają siły tarcia T (rys. 8.15 a), przenoszące całe obciążenie. Przy obciążeniu przekraczającym wartość sił tarcia wystąpi poślizg blach w ramach luzu poprzecznego (rys. 8.15 b). W takim przypadku obciążenie jest przenieszone częściowo siłami tarcia, a częściowo przez nity, które są narażone na docisk powierzchniowy oraz na ścinanie.



Rys. 8.15. Rozkład sił w połączeniu nitowym

Wartości naprężeń wywołujących docisk blach oraz wartości siły są trudne do określenia, np. ze względu na niemożność określenia temperatury nitów w chwili zakończenia procesu łączenia. Dlatego też, ze względu na konieczność uwzględnienia wpływu sił tarcia, przy obliczeniach wytrzymałościowych połączeń nitowych na gorąco przyjmuje się umowne dopuszczalne naprężenia ścinające, oznaczone jako k_n .

Przy stosowaniu nitów zamykanych na zimno wartości siły docisku i sił tarcia są znacznie mniejsze. W tym przypadku w obliczeniach wytrzymałościowych pomija się wpływ sił tarcia, przyjmując do obliczeń dopuszczalne naprężenia ścinające k_f . Orientacyjne wartości naprężeń dopuszczalnych k_n i k_f oraz nacisków dopuszczalnych k_o dla złączy nitowanych podano w tabeli 8.2.

Projektując połączenia stosowane w konstrukcjach pracujących w trudnych warunkach (np. w dźwignicach), należy przyjmować nieco mniejsze naprężenia dopuszczalne, uwzględniając dzięki temu dodatkowo wpływ innych czynników, tzn. rodzaju połączenia oraz warunków pracy, liczby rzędów nitów, sposobów wykonania otworów pod nity itp.

Rozstawienie nitów projektuje się w ten sposób, aby nie spowodować znacznego osłabienia blach, zapewnić dostateczną wytrzymałość połączenia w pozostałych przekrojach niebezpiecznych oraz swobodny dostęp narzędzi (wspornika, zakuwnika) przy nitowaniu sąsiednich nitów [5, 6]. W celu spełnienia tych warunków przyjmuje się zależności wymiarowe podane w tabeli 8.3.

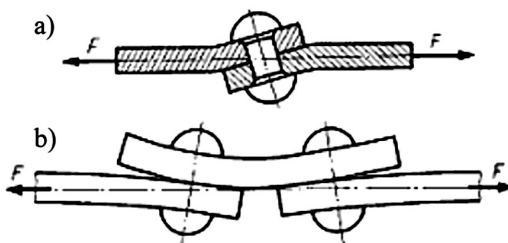
Tabela. 8.3. Rozmieszczenie nitów w połączeniach mocnych (oznaczenia wg rys. 8.13)

Wymiar		Symbol wymiaru	Wartość wymiaru
Podziałka	połączenie zakładkowe	L	$(3\div 5)d$
	połączenie nakładkowe		$(4\div 7)d$
Odległość rzędów nitów		A	$(0,6\div 0,8)$ lub $(2\div 3)d$
Odległość skrajnych nitów od krawędzi	blach	E	$(1,5\div 2,5)d$
	nakładek	e_1	$(1,5\div 2,5)d$
Odległość krawędzi ścięć od osi nitów		e_2	$(1,5\div 2)d$

Projektując połączenia nitowe mocne, należy uwzględnić także następujące wskazówki konstrukcyjne:

- grubość nakładek jednostronnych powinna wynosić $g_n \geq 1,1 g$, zaś grubość każdej nakładki dwustronnej – $g_n \geq 0,65 g$; przy spełnieniu tego założenia można nie sprawdzać wytrzymałości nakładek na rozciąganie,
- w najbardziej obciążonym przekroju blachy, tzn. w skrajnym rzędzie nitów, należy umieszczać – w miarę możliwości – tylko jeden nit, co minimalizuje osłabienie blachy,
- w szwach wielorzędowych stosuje się maksymalnie 5 rzędów nitów lub 5 nitów (w kierunku działania obciążenia),
- każdy element mocuje się co najmniej dwoma nitami,
- naroża zapasów i nakładek ścina się ukośnie (wg rys. 8.13a) w celu uniknięcia ich odginania oraz powstawania szczelin sprzyjających korozji.

W omawianych połączeniach mocnych najkorzystniejsze są połączenia dwunakładkowe, ponieważ linia działania siły jest równocześnie osią symetrii połączenia. Połączenia zakładkowe i z nakładką jednostronną okazują się mniej korzystne, gdyż są narażone dodatkowo na zginanie, natomiast w projekcie połączenia przewiduje się m.in. odgięcie blach w miejscu łączenia (rys. 8.16), zmniejszające do minimum naprężenia zginające.



Rys. 8.16. Odginanie blach w połączeniu: a) zakładkowym, b) nakładkowym jednostronnym

8.6. Przebieg ćwiczenia

8.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z procesami nitowania w produkcji maszyn, praktyczne zaprojektowanie i wykonanie typowych połączeń nitowych oraz sprawdzenie ich wytrzymałości.

8.6.2. Program realizacji ćwiczenia

- Analiza właściwości materiałów przygotowanych do nitowania.
- Opracowanie technologii nitowania.
- Przygotowanie powierzchni materiałów. Części przeznaczone do nitowania powinny być oczyszczone i powierzchnie ich prawidłowo do siebie dopasowane.
- Trasowanie miejsc usytuowania nitów i wykonanie otworów na nity.
- Ustalenie łączonych elementów.
- Zakucie łba nitów przy użyciu nitownicy ręcznej lub młotka.
- Przeprowadzenie wizualnej kontroli połączeń nitowych oraz próby wytrzymałościowej.

8.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Czudek H., Pietraszek T.: *Trwałość stalowych konstrukcji mostowych przy obciążeniach zmiennych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
2. Decker K.H.: *Maschinenelemente. Aufgaben*. Hanser. München 2018.
3. Haberhauer H., Bodenstern F.: *Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. Springer, Berlin 2005.
4. Rutkowski, A.: *Części maszyn*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
5. Skoć A.: *Przykłady obliczeń, zadania do rozwiązania z podstaw konstrukcji maszyn. T. 1, cz. 1, Ogólne zasady obliczeń, połączenia nierozłączne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
6. Skoć A., Spalek J.: *Podstawy konstrukcji maszyn. T. 1, Obliczenia konstrukcyjne, tolerancje i pasowania, połączenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.

9. Połączenia lutowane i zgrzewane

Połączenia spajane należą do połączeń nierozłącznych, bezpośrednich. W zależności od metody spajania łączenie elementów odbywa się przez kohezję (spójność międzycząsteczkową) lub przez dyfuzję (przenikanie cząsteczek). Przykładem połączeń spajanych są połączenia lutowane i zgrzewane, a także spawane i klejowe [4].

Lutowanie polega na łączeniu ze sobą elementów metalowych lub metalowych z ceramicznymi za pomocą dodatkowego metalu zwanego lutem. Lut jest stopem metali nieżelaznych. Ponieważ temperatura topnienia luta musi być niższa od temperatury topnienia łączonego lutem metalu, stąd przyłącza podczas lutowania nie ulegają nadtopieniu, lecz pozostają w stanie stałym. Proces lutowania polega na zbliżeniu do siebie powierzchni przewidzianych do łączenia na odległość tzw. szczeliny lutowniczej i wypełnieniu tej szczeliny lutem, aby po ostygnięciu otrzymać odpowiednie złącze lutowane [3].

Zgrzewanie metali polega na powstawaniu na powierzchniach styku łączonych części wspólnych ziaren, będących wynikiem dyfuzji i rekrytalizacji sąsiadujących ziaren metalu. Skuteczność procesu zgrzewania zależy głównie od ciśnienia, temperatury i czasu trwania procesu [4].

9.1. Charakterystyka procesu lutowania

Lutowaniem nazywa się metodę spajania metali za pomocą wprowadzania między łączone powierzchnie innego roztopionego metalu lub stopu metalu (czynnika łączącego), zwanego spoiwem. Podczas lutowania łączone części nagrzewają się, lecz nie topią się w miejscu łączenia. Połączenie trwałe uzyskuje się dzięki przyczepności lutu do materiałów łączonych, dlatego warunkiem otrzymania prawidłowego połączenia jest staranne oczyszczenie (mechaniczne i chemiczne) powierzchni lutowanych.

Lutowanie jest jednym z najstarszych sposobów łączenia metali. Jest jedną z licznych metod umożliwiających łączenie ze sobą różnych metali i ich stopów o różnych właściwościach. Najczęstsze zastosowanie lutowania obejmuje przemysł elektrotechniczny, elektroniczny i telekomunikacyjny (łączenie przewodów elektrycznych). Lutowanie jest stosowane podczas prac blacharskich, szczególnie do lutowania blach ocynkowanych, np. w produkcji rynien, do zamykania blaszanych puszek z konserwowanymi produktami spożywczymi. Ponadto lutowanie stosuje się w blacharstwie samochodowym, np. przy wypełnianiu wgłębień, wykonywaniu i naprawie chłodnic samochodowych, łączeniu uzwojeń silników elektrycznych, a także w naprawach pękniętych odlewów [7]. Połączenia lutowane dobrze przewodzą prąd i dlatego są stosowane zamiast spawania w przypadkach, gdy spoiny nie muszą przenosić dużych obciążeń, ale powinny zapewnić dobre przewodzenie prądu. Lutowanie polega na tym, że metal rodzimy pozostaje w stanie stałym, a topi się jedynie spoiwo, zwane lutem,

wprowadzone do szczeliny między elementami i łączące je dzięki zjawisku przyczepności powierzchniowej przy nieznacznym dyfundowaniu (przenikaniu) w głąb metalu rodzimego. Między łączone części doprowadza się ciekłe spoiwo metalowe o niższej temperaturze topnienia niż metal rodzimy.

Większość metali i stopów reaguje z otaczaj¹c¹ je gazową atmosfer¹ i tworzy na powierzchni warstewkę trudno topliwych, niemetalicznych związków tlenu, azotu, wodoru itp. Intensywność tego procesu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Wymaganą czystość łączonych powierzchni i lutu zapewniaj¹ przy lutowaniu substancje zwane topnikami. Topniki chronią powierzchnię przed utlenianiem. Właściwości ich zależą od właściwości zwilżających lutu. Powierzchnia metalu lutowanego będzie dobrze zwilżona przez lut, gdy będzie on tworzył szczelną błonę (a nie krople). Zależy to od następujących czynników [5, 6]:

- napięcia powierzchniowego,
- temperatury,
- stanu powierzchni,
- zanieczyszczeń,
- współczynnika zwilżania (W_z)

$$W_z = S \times \cos\Theta \quad (8.6)$$

gdzie:

Θ – kąt zwilżania,

S – powierzchnia lutu [mm^2],

własności kapilarnych połączenia – zdolność lutu do wypełniania szczelin (zależy od włoskowatości, gęstości, temperatury, zwilżania, rozmiarów szczeliny),

dyfuzji – zdolności cząsteczek do przenikania się. Dyfuzja zależy od: stopnia nagrzania, czasu, przewodności cieplnej, stanu powierzchni (w przypadku powierzchni zabrudzonych – nie będzie zachodzić zjawisko dyfuzji), doboru lutu (im większe różnice pomiędzy wymiarami atomów, tym większa dyfuzja).

9.2. Rodzaje lutowania

Rozróżnia się lutowanie lutami miękkimi, twardymi, specjalnymi oraz lutospawanie [3].

Lutowanie miękkie stosuje się do łączenia części o niedużych naprężeniach w złączu i niskiej temperaturze pracy, jak również do uszczelniania połączeń zawalcowanych i innych (np. cienkościennych zbiorników, pojemników, rynien, rurociągów).

Luty miękkie są wykonywane w postaci prętów, drutu, płytek, proszków, a najczęściej pałeczek. Zakres temperatury topliwości wynosi 183–270°C (stal, miedź, cynk itp. i ich stopy). Podczas lutowania miękkiego stosowane są spoiwa ołowioowo-cynowe, niektóre z nich zawierają ponadto drobne domieszki antymonu, srebra i miedzi, a pra-

wie wszystkie zanieczyszczenia w postaci śladowej zawartości żelaza, bizmutu, arsenu, aluminium, cynku i kadmu. Zawartość poszczególnych składników stopowych spoiwa wynika z jego oznaczenia [1, 2]. Poniżej przedstawiono kilka przykładów zawartości spoiw stosowanych w lutowaniu miękkim:

- PbAg1,5Sn1,5 zawiera ok. 1,5% Sn, ok. 1,5% Ag i ok. 97% Pb i jest stosowane do lutowania przewodów w źródłach światła,
- SnPb37Sb zawiera ok. 63% Sn, od 0,2% do 0,5% Sb i ok. 37% Pb. Spoiwo to ze względu na małą zawartość ołowiu jest używane do lutowania i pobielenia wewnętrznych części opakowań produktów spożywczych.

Do lutowania potrzebne są również topniki, bez których lut się utlenia i źle wypełnia szczeliny między łączonymi powierzchniami. Jako topników do lutowania miękkiego stali, miedzi i mosiądzu używa się najczęściej wody lutowniczej, którą tworzy chlorek cynku rozpuszczony w wodzie (np. 300 gramów stopionego technicznego chlorku cynku na 1 litr wody).

Jako topników do oczyszczania chemicznego powierzchni łączonych części używa się także salmiaku, kalafonii, stearyny i specjalnie przyrządzonych past. Oczyszczanie ręczne mechaniczne powierzchni łączonych dokonuje się z użyciem operacji piłowania, skrobania, ścierania itp.

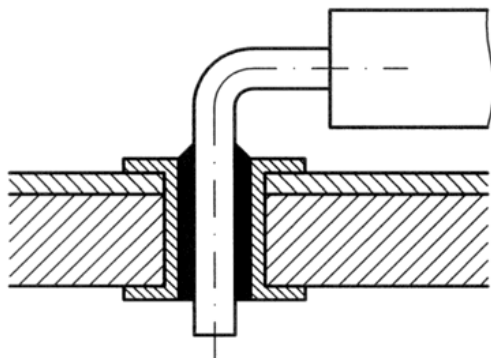
Lutowanie wykonuje się za pomocą narzędzia zwanego lutownicą. Najważniejszą częścią lutownicy jest końcówka miedziana, która po nagrzaniu służy do roztopienia cyny i przeniesienia jej na miejsce lutowania.

Przebieg procesu lutowania jest następujący: po nagrzaniu lutownicy szybko pociera się jej ostrze o salmiak i przykłada do lutu, który roztopia się i przylepia do ostrza lutownicy. Następnie lutownicę przykłada się do miejsca lutowanego i pociąga ostrzem wzdłuż szwu. Lutując większe połączenia, należy lut trzymać lewą ręką nad spoiną. Lutownica trzymana prawą ręką rozgrzewa materiał łączony i jednocześnie topi lut. Roztopiony lut ścieka i łączy powierzchnie, zastygając między nimi. Gdy zachodzi potrzeba, to lutownicę kilkakrotnie przesuwamy wzdłuż szczeliny łączącej. W czasie lutowania należy tak prowadzić lutownicę, aby lut nie rozpląwał się po wierzchu, lecz spływał w głąb szwu. Po zalutowaniu usuwa się nadmiar lutu za pomocą skrobaka lub pilnika i przemywa się szew letnią wodą [3, 7].

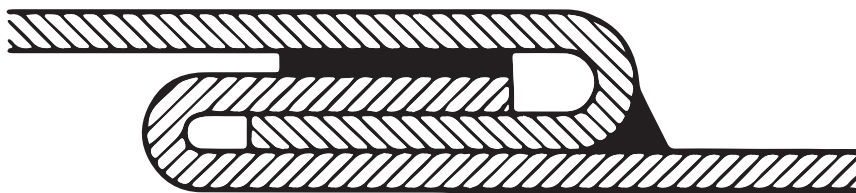
Lutowanie twarde – temperatura topnienia spoiw znajduje się w przedziale 600–1080°C. Lutowanie twarde stosuje się podczas występowania znacznych naprężeń w złączu oraz dużej temperatury pracy (ponad 150°C). Jest używane do połączeń ślusarskich, w budowie ram rowerowych, w kołnierzach połączeń rurociągów, do łączenia części mechanizmów precyzyjnych, w produkcji narzędzi skrawających. Jako czynnik odtleniający podczas lutowania ma zastosowanie boraks. Lutami twardymi są miedź lub stopy miedzi (mosiądze, brązy, stopy miedzi z fosforem, srebrem, krzemem, manganem), stopy srebra z miedzią, cynkiem oraz nikiel z dodatkiem manganu [3, 7].

Lutowanie twarde odbywa się w następujący sposób: powierzchnie łączone dokładnie czyści się i dopasowuje do siebie. Następnie nakłada się pędzlem warstwę boraksu. Między powierzchniami łączonymi umieszcza się blaszkę lutu, a następnie wiąże się obie powierzchnie drutem. Po posypaniu boraksem związanych części nagrzewa się je w ognisku kowalskim, palnikiem gazowym lub lampą lutowniczą tak długo, aż lut się roztopi i zwiąże części łączone. Do podgrzewania można używać także palnika acetylenowego, lecz trzeba bardzo uważać, aby nie przegrzać spoiny. W niektórych przypadkach lut umieszcza się na zewnątrz łączonych powierzchni wzdłuż szwu. Wiązanie drutem łączonych elementów nie zawsze jest konieczne, zwłaszcza podczas nagrzewania palnikiem. Łączone elementy można zamocować w imadle, umieścić na stalowej płycie lub stole spawalniczym. Przy takim rozwiązaniu należy zwrócić szczególną uwagę, aby łączone elementy i lut nie zmieniły swojego położenia podczas wykonywania połączenia. Po wykonaniu lutowania wyjmuje się połączone części i zostawia je do powolnego ostygnięcia, a następnie przemywa szew wodą zakwaszoną i usuwa nadmiar lutu pilnikiem.

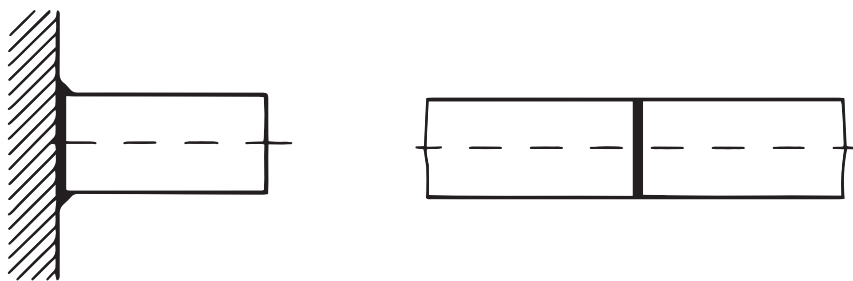
Przykłady połączeń lutowanych przedstawiono na rysunkach 9.1–9.3.



Rys. 9.1. Przyłączenie elementu elektronicznego do płytki połączone z lutowaniem



Rys. 9.2. Kształtowe łączenie blach



Rys. 9.3. Przykłady zastosowania lutowania twardego

Do oczyszczania chemicznego używa się zwykle roztworu wodorotlenku sodu, który skutecznie usuwa tlenki z powierzchni przeznaczonej do lutowania.

Połączenie lutowane należy poddać kontroli, zwracając uwagę na równomierne rozłożenie lutu i estetyczne wykonanie spoiny. Następnie należy sprawdzić szczelność połączenia. Wstępne sprawdzenie szczelności dokonuje się próbą wodną, obserwując, czy nie ma przecieku przez spoinę. Dokładne sprawdzenie szczelności spoiny wykonuje się w następujący sposób: jedną stronę spoiny pokrywa się warstwą kredy, zaś na drugą stronę wlewa się niewielką ilość nafty, obserwując, czy na warstwie kredy nie pojawiają się tłuste plamy. W przypadku lutowania zbiorników szczelność należy sprawdzać pod ciśnieniem powietrza lub wody – wyższym od ciśnienia pracy. Do sprawdzania bardziej odpowiedzialnych połączeń lutowanych stosuje się badania defektoskopowe, rentgenowskie, wytrzymałościowe, metalograficzne, oporności elektrycznej i inne, jak np. próby na odrywanie, które umożliwiają określenie stopnia wypełnienia szczeliny lutem [4].

Zasady BHP podczas wykonywania połączeń lutowanych są następujące:

- podczas pracy z kwasami należy chronić ciało i ubiór przed ich żrącym działaniem,
- przygotowując wodny roztwór kwasu, należy zawsze wlewać kwas do wody,
- lutownicę, palnik i inne nagrzewające narzędzia należy trzymać w bezpiecznej odległości od ciała,
- sprawdzić uziemienie lutownicy elektrycznej.

Inne rodzaje lutowania to lutowanie:

- płomieniowe,
- kąpielowe,
- piecowe,
- indukcyjne,
- oporowe,
- reakcyjne,
- dyfuzyjne,
- ultradźwiękowe,
- świetlne,

- laserowe,
- elektronowe,
- strumieniem gorącego gazu,
- lutowanie.

9.3. Połączenia zgrzewane

Zgrzewanie jest to rodzaj technologii trwałego łączenia części wykonanych z metalu lub tworzyw polimerowych. Proces ten polega na rozgrzaniu stykających się powierzchni tak, aby przeszły one w stan plastyczny i dociśnięciu ich, przy czym uplastycznieniu ulega tylko niewielka objętość na granicy styku obu materiałów.

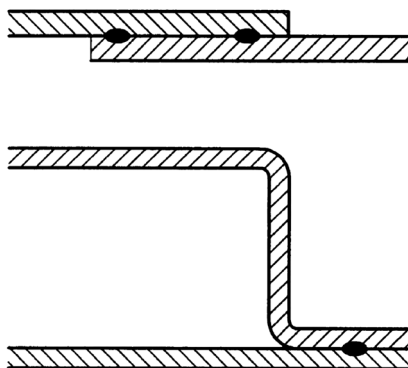
W zależności od sposobu nagrzewania części łączonych rozróżnia się zgrzewanie:

- gazowe (np. palnikiem acetylenowo-tlenowym),
- elektryczne: iskrowe lub oporowe (zwarciowe),
- termitowe – umożliwiające bardzo szybkie nagrzanie części,
- tarciove – ciepło wytwarza się przez tarcie powierzchni styku przy zastosowaniu odpowiedniego docisku.

Połączenia zgrzewane uzyskuje się również przez wywarcie dużego nacisku (na zimno) lub innymi metodami, stosując zgrzewanie zgniotowe, wybuchowe lub ultradźwiękowe.

9.4. Charakterystyka wybranych rodzajów zgrzewania

Zgrzewanie punktowe polega na łączeniu za pomocą szeregu punktów 2 elementów cienkościennych ułożonych jeden na drugim (blacha na zakładkę) – rysunek 9.4. Zgrzewanie punktowe jest podstawowym i najbardziej rozpowszechnionym sposobem zgrzewania oporowego. Znajduje ono najczęściej zastosowanie przy łączeniu elementów wykonanych ze stali węglowych i stopowych, niklu, tytanu, aluminium i ich stopów oraz niektórych stopów miedzi.



Rys. 9.4. Przykłady zgrzewania punktowego

Zgrzewanie doczołowe iskrowe jest stosowane do łączenia elementów o przekroju walcowym. W metodzie tej powierzchnie nie muszą być dobrze oczyszczone, gdyż prąd przepływający przed dociskiem powoduje, że wszelkie nierówności ulegają stopieniu. Część metalu ze styku zostaje usunięta, a pozostałość na powierzchniach łączonych nagrzewa warstwy metalu. Powstałe w procesie wyiskrzania pary metalu zapobiegają przenikaniu tlenu i azotu z otaczającego powietrza do roztopionych powierzchni, co wywiera bardzo korzystny wpływ na właściwości mechaniczne powstającego złącza. Zaletami tej metody są: dobra jakość połączeń, większa wytrzymałość tych połączeń niż w przypadku zgrzewania doczołowego zwarciovego, mniejszy koszt przygotowania materiałów. Zgrzewanie doczołowe iskrowe stosowane jest do zgrzewania stali węglowych, stopowych, brązów, mosiądzów, stopów niklu, aluminium z miedzią. Często stosuje się tę metodę do wykonywania łańcuchów kotwic.

9.5. Przebieg ćwiczenia

9.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z ogólną budową urządzeń do zgrzewania oraz z przebiegiem procesów: lutowania i zgrzewania.

9.5.2. Program realizacji ćwiczenia

Lutowanie miękkie

- Przed przystąpieniem do właściwego procesu lutowania powierzchnie łączonych części należy zabielić. W kolejnym kroku złożyć łączone elementy zabielonymi powierzchniami do siebie. Następnie wykonać operację lutowania do momentu wypłynięcia lutu poza krawędzie wykonywanego połączenia,
- Urządzenia i materiały: źródło ciepła – lutownica kolbowa z grotem miedzianym, topnik: wodny roztwór chlorku cynku, lut – LC60, materiał: stal ST0 o grubości 0,5 mm.

Lutozgrzewanie

- Przed przystąpieniem do wykonania połączeń należy umieścić w szczękach zaciskowych łączone elementy, następnie posypać sproszkowany boraks na powierzchnie elementów, dodać lut, doprowadzić źródła ciepła oraz docisnąć łączone elementy. Podczas dostarczania ciepła może wystąpić iskrzenie, co świadczy o zawilgoceniu topnika.
- Urządzenia i materiały: źródło ciepła – zgrzewarka – transformator, topnik: BORAKS, lut – LS70 – na podstawie srebra (70% srebra), materiał: stal ST0 o grubości 0,5 mm.

Lutowanie twarde

- Urządzenia i materiały: źródło ciepła – płomień acetylenowo-tlenowy, palnik PSC1 o nasadzie nr 3, topnik – boraks, lut: drut mosiężny LM63, materiał: stal SC3S o grubości 2 mm.

Zgrzewanie punktowe zgrzewarką ręczną

- Urządzenia i materiały: źródło ciepła – zgrzewarka – transformator, materiał: drut stalowy.

Zgrzewanie doczołowe – iskrowe

- Należy umieścić obrabiany materiał w szczękach zaciskowych, a następnie impulsowo podawać prąd.
- Zgrzewarka wyposażona jest w regulator czasu, natężenia prądu oraz siły nacisku.
UWAGA:
- wszystkie parametry, takie jak czas, docisk i natężenie prądu, dobiera się eksperymentalnie w zależności od materiału oraz wykonywanego elementu,
- podczas zgrzewania należy zwrócić uwagę na bocznikowanie prądu i odpowiednio dobierać wartości natężenia prądu.

9.5.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

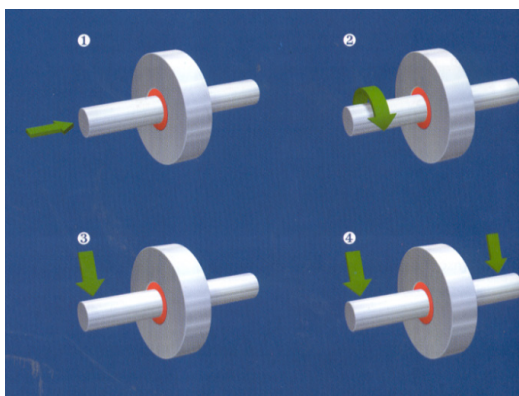
Bibliografia

1. Decker K.H.: *Maschinenelemente. Aufgaben.* Hanser, München 2018.
2. Nowacki J., Chudziński M., Zmitrowicz P.: *Lutowanie w budowie maszyn.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
3. Porębska M., Skorupa A.: *Połączenia spójnościowe.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
4. Rutkowski, A.: *Części maszyn.* Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
5. Skoć A.: *Przykłady obliczeń, zadania do rozwiązania z podstaw konstrukcji maszyn. T. 1, cz. 1, Ogólne zasady obliczeń, połączenia nierozłączne.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
6. Skoć A., Spałek J.: *Podstawy konstrukcji maszyn. T. 1, Obliczenia konstrukcyjne, tolerancje i pasowania, połączenia.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
7. Wrotek W.: *Lutowanie od podstaw.* Helion, Gliwice 2020.

10. Konstrukcja i technologia połączeń klejowych cylindrycznych

10.1. Konstrukcja i technologia połączeń klejowych współosiowych

Połączenia klejowe typu wał–piasta są przykładem połączeń współosiowych. Połączenia tego typu charakteryzują się m.in. tym, iż dobrze przenoszą obciążenia promieniowe i styczne, a także różnego rodzaju momenty zginające [1]. Przykład połączenia współosiowego oraz niektóre warianty obciążeń tego typu połączenia przedstawiono na rysunku 10.1 [8].



Rys. 10.1. Obciążenia działające na połączenia klejowe współosiowe: 1 – obciążenie osiowe, 2 – moment skręcający, 3 – obciążenie zginające, 4 – obciążenie promieniowe [8]

Wśród połączeń klejowych współosiowych wyróżnia się:

- połączenia klejowe pasowane luźno – części są wykonane z luzem, a utwardzony klej przenosi wszystkie obciążenia,
- połączenia klejowe skurczowe lub wtlaczane – obciążenia przenoszone są zarówno przez utwardzony klej, jak i przez tarcie między częściami, wynikające z cięsnego pasowania.

W wymienionych wyżej przypadkach na powierzchnie łączone nanosi się płynny klej, który całkowicie wypełnia połączenie i ulegając polimeryzacji, łączy klejone powierzchnie.

Zalety klejenia połączeń współosiowych [3]:

- wzmacnia lub zastępuje połączenia mechaniczne,
- eliminuje korozję cierną,

- tworzy połączenie mocniejsze i sztywniejsze w porównaniu z innymi połączeniami powstałymi za pomocą innych technik spajania,
- eliminuje wybijanie połączeń wpustowych i klinowych,
- eliminuje dodatkowe elementy zabezpieczające,
- eliminuje nadmiar materiału niezbędny do wywołania bardzo dużych naprężeń obwodowych,
- nie wymaga zachowania ścisłych tolerancji,
- istnieje możliwość demontażu połączenia przez jego podgrzanie,
- możliwe jest łączenie różnych materiałów, także elementów cienkościennych,
- występuje redukcja naprężeń przez ich równomierny rozkład,
- możliwe jest zmniejszenie kosztów obróbki,
- umożliwiają łączenie powierzchni twardych i miękkich bez ich uszkodzenia,
- całkowicie uszczelnia połączenie, eliminując korozję.

Dodatkowym atutem połączeń klejowych współosiowych jest to, że właściwie nie posiadają istotnych wad.

Połączenia klejowe współosiowe powinny być tak skonstruowane, aby były obciążane naprężeniem ściskającym i ścinającym, natomiast należy unikać obciążenia odzierającego.

Kleje wypełniają w połączeniu wszystkie luki. Kiedy ulegną utwardzeniu, eliminują wszelkie przesunięcia pomiędzy dwoma elementami, zwiększając tym samym zdolność połączenia do przenoszenia długotrwałego obciążenia. Zakres wytrzymałości kleju na obciążenie osiowe oznacza, że w niektórych przypadkach można zrezygnować z elementów osiowego ustalania wałków, takich jak: pierścienie sprężynujące, tuleje czy też kołki [2].

W przypadku połączeń pasowanych wciskowo, po zastosowaniu kleju, powierzchnia kontaktu łączonych powierzchni (wału i piasty) wzrasta do około 100%, co sprawia, że cała powierzchnia kontaktu połączenia przenosi obciążenia ścinające i naciski (przy połączeniu skurczowym lub wtlaczanym maksymalny kontakt od metalu do metalu przylegających do siebie powierzchni wału i piasty wynosi maksymalnie 25–30%).

Przykłady zastosowań klejowych połączeń współosiowych przedstawiono poniżej [4]:

- wklejanie łożysk,
- wklejanie łożysk tocznych i ślizgowych (np. grafitowych) w produkcji pomp,
- wklejanie łożysk na przegubach i łożysk skrętnych (serwis koparek budowlanych),
- wklejanie łożysk i tulejek w produkcji sprzętu AGD,
- wklejanie łożysk i komutatorów w produkcji silników elektrycznych,
- wklejanie piast i łożysk w produkcji krążników (przemysł wydobywczy),
- wklejanie łożysk wózków jezdnych w tramwajach,

- wklejanie łożysk w uszkodzone gniazda łożyskowe (z za dużym luzem – zużycie gniazda po obróceniu się łożyska) – przekładnie przemysłowe, silniki elektryczne, pompy, uszczelnianie powierzchni płaskich.



Rys. 10.2. Osadzanie łożyska w turbinie wodnej napędzającej generator

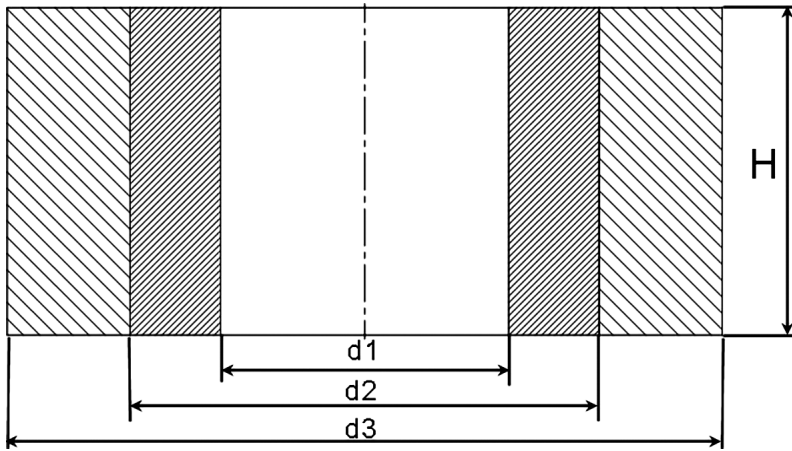
10.2. Obliczenia wytrzymałości połączeń klejowych współosiowych

Obliczenia analityczne wytrzymałości analizowanych połączeń klejowych mają na celu wstępną ocenę, czy zaprojektowana konstrukcja osiągnie wymaganą wytrzymałość (możliwość przeniesienia wymaganego obciążenia).

Badania wytrzymałościowe pozwalają dokonać oceny nie tylko wytrzymałości spoiny kleju, ale także poprawności dobrania i przeprowadzenia technologii przygotowania powierzchni łączonych elementów oraz procesu klejenia. W trakcie badań dokonuje się pomiarów siły niszczącej przy ustalonej prędkości obciążania. Siły niszczące mogą być skierowane w różny sposób względem spoiny kleju: wzdłużnie, poprzecznie lub ukośnie. Najczęściej spotykane obciążenia powodują ścinanie, oddzieranie lub odrywanie. Średnie wartości naprężeń niszczących wyznacza się jako stosunek siły niszczącej do powierzchni klejenia (np. ścinanie) lub do długości spoiny oddzieranej (oddzieranie) albo do wartości momentu bezwładności przekroju spoiny.

Obliczenie pola powierzchni sklejenia

Wymiary elementów przyjętych do obliczenia wytrzymałości połączenia klejowego współosiowego obciążonego siłą osiową można przyjąć zgodnie z rysunkiem 10.3.



Rys. 10.3. Rysunek połączenia współosiowego, gdzie: H – wysokość tulei wciskanej, d_1 – średnica wewnętrzna tulei wciskanej, d_2 – średnica zewnętrzna tulei wciskanej – średnica otworu obudowy, d_3 – średnica zewnętrzna obudowy

Pole powierzchni sklejenia w przypadku połączeń klejowych współosiowych można obliczyć z następującej zależności [6, 7]:

$$P_w = \pi d_2 H \quad (10.1)$$

Obliczenie wytrzymałości połączenia współosiowego poddanego obciążeniu siłą osiową

Połączenie klejowe cylindryczne poddane obciążeniu siłą osiową można obliczyć z zależności (10.2) w przypadku, gdy pasowanie między elementami łączonymi zapewnia uzyskanie luzu. W takiej sytuacji całość obciążenia przenoszona jest przez warstwę kleju, dlatego obliczenie wytrzymałości połączenia sprowadza się do wyznaczenia jego wytrzymałości na ścinanie powierzchni cylindrycznej kleju [6]:

$$R_t = \frac{Q_w}{P_w} \quad (10.2)$$

gdzie:

- R_t – średnia wytrzymałość na ścinanie,
- Q_w – obciążenie pochodzące od siły osiowej.

W przypadku, gdy w wyniku pasowania do montażu połączenia musi zostać użyta dodatkowa siła pozwalająca pokonać wcisk wynikający z tolerancji wykonania otworu i wałka, w obliczeniach wytrzymałościowych należy uwzględnić wzrost wartości obliczonej ze wzoru (10.2) o wartość spowodowaną wciskiem.

10.3. Technologia wykonania klejowych połączeń współosiowych

W celu uzyskania połączenia klejowego współosiowego o pożądanych właściwościach należy dokładnie oczyścić i odtłuścić powierzchnie łączonych elementów. Połączenie musi być całkowicie wypełnione klejem. Aby to osiągnąć, w połączeniach pasowanych luźno należy nanieść klej wokół wałka i krawędzi tulei. Ruch obrotowy części podczas montażu zapewni dokładne rozprowadzenie kleju. W połączeniach wtłaczanych należy starannie pokryć klejem obie klejone powierzchnie i wykonać szybki montaż pod dużym naciskiem. W połączeniach pasowanych skurczowo klej nanosi się na wałek; zaś tuleję należy rozgrzać do temperatury pozwalającej jedynie na powstanie dostatecznego luzu do swobodnego montażu. Połączone elementy połączenia należy pozostawić aż do osiągnięcia pełnej wytrzymałości. Obecnie dostępne na rynku kleje mają zdolność utwardzania się nawet po nałożeniu cienkiej warstwy większości olejów konserwacyjnych. Niektóre oleje zawierają składniki zabezpieczające przed rdzą (np. azotyn sodowy), które działają hamująco na proces utwardzania kleju. Szybkość utwardzania i wytrzymałość końcowa połączenia na powierzchniach zaolejonych będą zależały od rodzaju oraz ilości użytego oleju [4, 5]. Dlatego też przed ostatecznym opracowaniem i przyjęciem danej technologii do produkcji należy przeprowadzić serię prób, które pozwolą potwierdzić słuszność przyjętych założeń.

10.4. Przebieg ćwiczenia

10.4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z technologią wykonywania połączeń klejowych współosiowych oraz ich charakterystyką. Celem dodatkowym jest praktyczne wykonanie przykładowego połączenia współosiowego: łożysko-piasta oraz porównanie wartości siły potrzebnej do montażu i demontażu połączenia łożysko-piasta przy doborze różnych pasowań.

Celem ćwiczenia jest także określenie wytrzymałości analizowanego połączenia klejowego.

10.4.2. Program realizacji ćwiczenia

Przygotowanie elementów do klejenia

Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia łączone elementy należy poddać oględzinom oraz dokonać pomiaru powierzchni cylindrycznej wewnątrz obudowy łożyska. Wykonane pomiary zapisać w protokole badawczym.

Przygotowanie powierzchni do klejenia

W celu uzyskania właściwej chropowatości powierzchni zalecana jest obróbka powierzchni w celu uzyskania chropowatości w granicach 0,8–3,2 μm . Sprzyja to wni-

kaniu kleju w mikropory i wgłębienia materiału, w wyniku czego następuje „zakotwiczenie się” kleju. Dodatkowo pozwoli to usunąć pozostałe resztki kleju z powierzchni łączonych w przypadku elementów łączonych ponownie.

Zaleca się odtłuszczenie powierzchni, aby usunąć z łączonych powierzchni wszelkie zanieczyszczenia wpływające na obniżenie wytrzymałości połączenia klejowego. Przed przystąpieniem do oczyszczania należy upewnić się, że zastosowane środki chemiczne nie pozostawią żadnych śladów utrudniających utwardzanie się kleju. Środki do odtłuszczenia wydaje osoba prowadząca ćwiczenie.

Etap montażu połączenia klejowego współosiowego

Zapewnienie odpowiednich warunków składania połączeń klejowych współosiowych polega przede wszystkim na kompensacji błędów wzajemnego położenia łączonych powierzchni: mimośrodowości e oraz kąta ukosowania α .

Etap I – polega na wstępnym pozycjonowaniu łączonych elementów. W tym celu element przyłączany wykonuje poszukiwawczy ruch obrotowy wokół własnej osi i przemieszcza się ruchem postępowym w kierunku elementu bazowego.

Etap II – polega na składaniu poszczególnych elementów połączenia klejowego współosiowego, podczas którego do strefy pomiędzy łączonymi powierzchniami podawany jest płynny klej.

Etap III – w takcie tego etapu następuje polimeryzacja uprzednio naniesionej masy kleju. W tym czasie obserwuje się stopniowe zwiększanie lepkości kleju, co w połączeniu z ruchem obrotowym części przyłączanej sprzyja ostatecznemu samosiowaniu się połączenia.

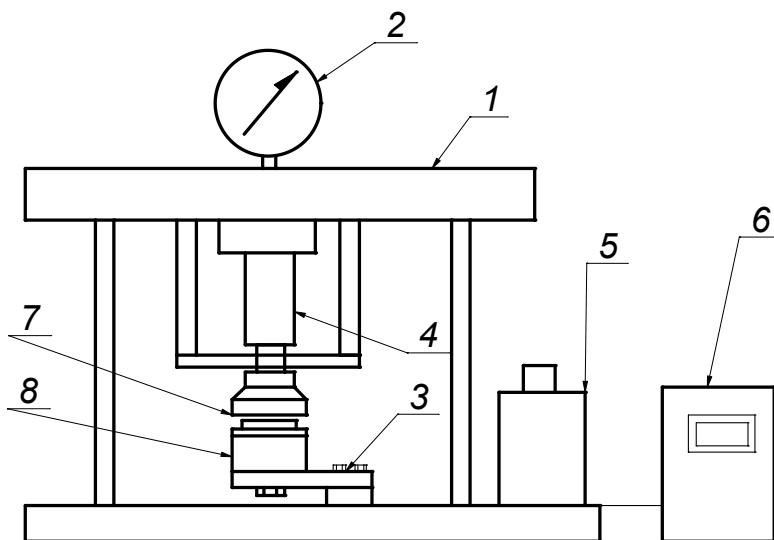
Etapy wykonania ćwiczenia:

1. Przygotować powierzchnie tulei obudowy oraz łożyska do klejenia poprzez odtłuszczenie środkiem odtłuszczającym. W przypadku użycia tulei obudów wcześniej klejonych usunąć najpierw za pomocą papieru ściernego resztki kleju.
2. Wykonać połączenia klejowe współosiowe. Operacja ta obejmuje następujące czynności:
 - umieszczenie obudowy łożyska w korpusie,
 - wstępne pozycjonowanie łączonych elementów – łożysko umieścić na górnej powierzchni czoła obudowy,
 - w połączeniach pasowanych luźno należy nanieść klej wokół łożyska i krawędzi tulei obudowy, a następnie wykonując ruch obrotowy łożyska, podczas montażu zapewnić dokładne rozprowadzenie kleju po całej powierzchni,
 - w przypadku połączeń wtłaczanych dokonać wstępnego wtłoczenia łożyska w obudowę, mierząc wartość siły potrzebnej do montażu w funkcji długości czynnej połączenia i demontażu łożyska, a następnie przejść do etapu wklejenia łożyska,

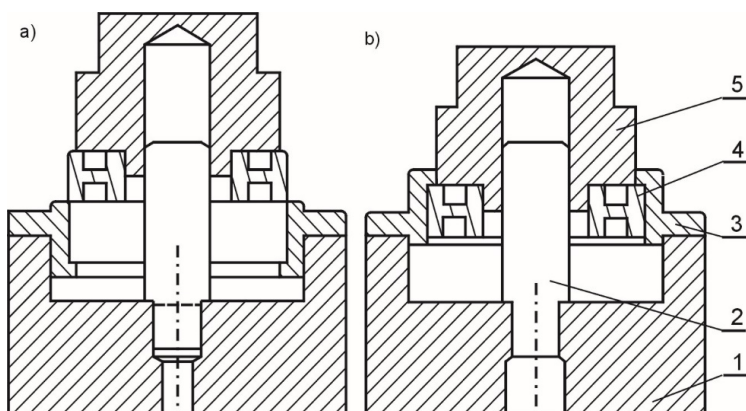
- w przypadku połączeń wtłaczanych należy przed dokonaniem wtłoczenia starannie pokryć klejem obie klejone powierzchnie, następnie wykonać szybki montaż pod dużym naciskiem,
 - wciśnięcia łożyska w obudowę dokonać poprzez wywieranie na łożysko nacisku za pomocą stempla. Właściwe osiowe prowadzenie stempla zapewnia znajdujący się w korpusie sworzeń. Po każdorazowym wykonaniu ruchu tłoczącego pompą zapisywać wartość siły w funkcji długości zgodnie ze wskazaniem rejestratora.
3. Wykonać demontaż połączenia współosiowego:
- wykonane wcześniej połączenie klejowe obudowy i łożyska umieścić w korpusie, przekręcając odwrotnie obudowę. Następnie za pomocą stempla wycisnąć łożysko. Po każdym wywarciu ciśnienia za pomocą pompy ręcznej rejestrować wartość wskazań rejestratora siły.

10.4.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 10.4 składa się z płyty podstawy wraz z górną belką 1, do której zamocowany jest siłownik hydrauliczny 4. Za pomocą ręcznej pompy 5 olej tłoczony jest do siłownika poprzez przewody, co powoduje wywieranie siły poprzez końcówkę 7 na zestaw montażowy 8. Rejestracja siły możliwa jest dzięki zastosowaniu mostka tensometrycznego sprzężonego z rejestratorem 6.



Rys. 10.4. Stanowisko wywierania statycznego obciążenia osiowego: 1 – górną belką, 2 – sworzeń, 3 – łożysko, 4 – siłownik hydrauliczny, 5 – pompa, 6 – rejestrator, 7 – końcówka, 8 – zestaw montażowy



Rys. 10.5. Widok przekroju poprzez zestaw montażowy: a) wtlaczanie łożyska, b) wyciskanie łożyska:
 1 – górna belka, 2 – sworzeń, 3 – łożysko, 4 – siłownik hydrauliczny, 5 – pompa

Zestaw montażowy przedstawiony na rysunku 10.5 składa się z korpusu 1 połączonego śrubą z mostkiem tensometrycznym. W kieszeni korpusu umieszcza się obudowę łożyska 3, w którego gniazdo wciskane jest łożysko 4 poprzez stempel 5 prowadzony za pomocą sworznia 2. Obudowy łożysk zostały wykonane w trzech wariantach (Tab. 10.1) wymiarowych w celu uzyskania trzech różnych pasowań zgodnie z zaleceniami dotyczącymi tolerancji średnic gniazd w oprawach łożysk tocznych:

I wariant – pasowanie P7 – stosowane przy dużych obciążeniach, dla obudów cienkościennych, m.in. w kołach samolotów, przednich kołach samochodów,

II wariant – pasowanie J7 – obciążenia normalne i duże, stosowane w silnikach elektrycznych oraz wałach silników spalinowych,

III wariant – pasowanie G7 – stosowane przy małych i normalnych warunkach obciążenia przy możliwym dopływie ciepła przez wał. Używane w cylindrach suszarni i maszynach piekarniczych.

Tabela 10.1. Warianty wymiarowe obudowy łożysk

Wariant	Pasowanie	Odchyłka nominalna [μm]
I	$\phi 72 P7$	-21 -51
II	$\phi 72 J7$	+18 -12
III	$\phi 72 G7$	+40 +10

10.4.4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Ebnesajjad S. ed.: *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*. William Andrew/Elsevier, Amsterdam 2011.
2. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Fundacja „Książka Naukowo-Techniczna”, Warszawa 2002.
3. Porębska M., Skorupa A.: *Połączenia spójnościowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
4. Rudawska A.: *Oprządkowanie w technologii klejenia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
5. Rutkowski, A.: *Części maszyn*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
6. Skoć A.: *Przykłady obliczeń, zadania do rozwiązania z podstaw konstrukcji maszyn. T. 1, cz. 1, Ogólne zasady obliczeń, połączenia nierozłączne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
7. Skoć A., Spalek J.: *Podstawy konstrukcji maszyn. T. 1, Obliczenia konstrukcyjne, tolerancje i pasowania, połączenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
8. <https://www.woronko-kleje.pl/>

11. Inżynieria zabezpieczania połączeń śruba–nakrętka

11.1. Definicje

Moment dokręcający T_{ON} [Nm] – maksymalny moment obrotowy wymagany do nakręcenia nakrętki na śrubę pokrytą klejem.

Moment wejściowy T_{IN} [Nm] – moment przyłożony w celu wprowadzenia lub zwiększenia obciążenia osiowego układu. Służy do pokonania tarcia na gwincie i pod łbem śruby.

Moment zrywający T_{BA} [Nm] – początkowy moment obrotowy potrzebny do zerwania złącza, mierzony w momencie wystąpienia pierwszego ruchu między nakrętką a śrubą podczas odkręcania układu nieumocowanego.

Moment luzujący T_{BL} [Nm] – początkowy moment obrotowy potrzebny do zmniejszenia lub wyeliminowania obciążenia osiowego w układzie wstępnie obciążonym.

Moment odkręcający T_p [Nm] – moment obrotowy mierzony po początkowym zerwaniu złącza przy określonym kącie obrotu nakrętki. Podczas badania na zgodność z wymogami technicznymi kąt ten powinien wynosić 180° .

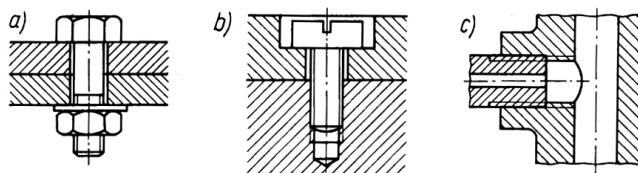
11.2. Połączenia gwintowe

Połączenia gwintowe są połączeniami kształtowymi, rozłącznymi, najczęściej stosowanymi w budowie maszyn. Zasadniczym elementem połączenia gwintowego jest łącznik, składający się najczęściej ze śruby (z gwintem zewnętrznym) i nakrętki (z gwintem wewnętrznym). Skręcenie ze sobą obu gwintów łącznika tworzy połączenie gwintowe.

Połączenie gwintowe może być [3]:

- pośrednie – części maszyn łączy się bezpośrednio za pomocą łącznika, rolę nakrętki może również odgrywać gwintowany otwór w jednej z łączonych części,
- bezpośrednie – gwint jest wykonany na łączonych częściach.

Przykłady tych połączeń przedstawiono na rysunku 11.1 [1].



Rys. 11.1. Połączenie gwintowe: a, b) pośrednie, c) bezpośrednie [1]

Gwinty są stosowane również w mechanizmach śrubowych, określanych także jako połączenia gwintowe ruchowe. Mechanizmy śrubowe służą do zmiany ruchu obroto-

wego na ruch postępowo-zwrotny; są stosowane do celów napędowych, m.in. do przesuwu stołu lub suportu w obrabiarkach, tworzą zespoły robocze w podnośnikach lub prasach śrubowych.

Do najczęściej stosowanych zaliczyć można gwinty (ze względu na zarys gwintu):

- trójkątne: metryczne, rurowe walcowe,
- trapezowe: symetryczne i niesymetryczne,
- prostokątne,
- okrągłe.

Nakrętki (elementy z gwintami wewnętrznymi) współpracują ze śrubami i wkrętami. Kształty nakrętek, podobnie jak łbów śrub i wkrętów, są dostosowane do potrzeb konstrukcyjnych [1].

Przyczyny zawodności połączeń gwintowych:

- zmniejszenie naprężenia osiowego – połączenie gwintowe luzuje się, gdy nastąpi trwała zmiana jego długości wzdłuż osi pracującego gwintu. Zjawisko to może wystąpić, gdy element pośredniczący (np. podkładka) ulegnie deformacji,
- samoodkręcanie się – po dociągnięciu połączenia obciążenie zaciskające utrzymuje się poprzez naprężenie wstępne śruby. W przypadku, gdy moment dociągania przestanie działać, siła naprężająca zaczyna powodować odkręcanie nakrętki ze śruby. Tarcie w gwintach i pod łbem śruby i nakrętki przeciwstawia się tej sile, podtrzymując napięcie w śrubie. Środkiem zapobiegającym samoodkręcaniu się gwintów może być zastosowanie specjalnych śrub i nakrętek z zębami ryglującymi, stosowanie śrub z kołnierzami żebrowanymi lub klejenie łączników.

11.3. Zabezpieczenia przed samoodkręcaniem się gwintów poprzez klejenie

Jednym ze sposobów zapobiegającym odkręcaniu się gwintów jest klejenie. Zastosowanie kleju należy do najbardziej skutecznych środków zabezpieczających połączenia gwintowe. Klej tworzy połączenie nierozłączne i wyklucza jakikolwiek ruch w połączeniu gwintowym. Aby poprawnie dobrać odpowiedni rodzaj kleju zabezpieczającego połączenia gwintowe, należy posiadać odpowiednie informacje dotyczące [1]:

- temperatury – należy określić zakres temperatury pracy połączenia,
- rozmiaru gwintu – w zależności od rodzaju i wartości skoku gwintu dobiera się lepkość kleju,
- środowiska pracy połączenia – rozważenie wpływu czynników chemicznych i warunków otoczenia, w których połączenie ma pracować – szczególnie istotne w przypadku produkcji żywności i napojów,
- wytrzymałości – mając na uwadze zachowanie wytycznych dotyczących warunków montażu i demontażu połączenia, należy zdecydować o wyborze odpowiedniego środka zabezpieczającego,

- materiału – określenie materiału elementów złącznych musi zostać dokonane z uwagi na konieczność użycia w pewnych przypadkach aktywatorów. Rodzaj materiałów tworzących połączenie ma wpływ na szybkość utwardzania kleju.

11.4. Środki do zabezpieczania gwintów

Kleje stosowane jako środki zabezpieczające połączenia śrubowe muszą spełniać wymagania związane z koniecznością zapewnienia odpowiedniej jakości i niezawodności. Z tych względów do zabezpieczania połączeń stosuje się kleje anaerobowe [2].

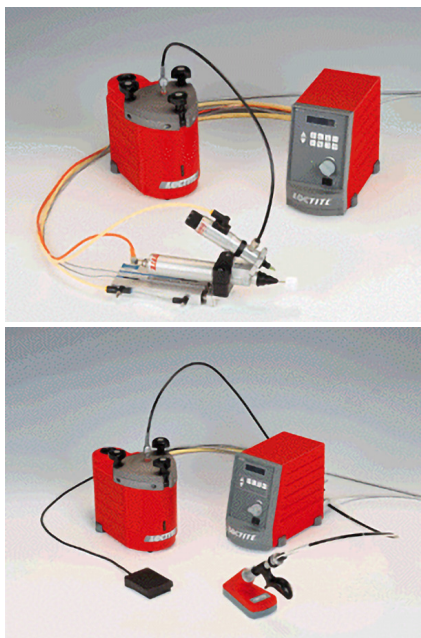
Kleje anaerobowe to jednoskładnikowe materiały, które utwardzają się w temperaturze pokojowej po odcięciu dopływu tlenu z otoczenia. Składniki utwardzające nie zostają aktywowane, dopóki powierzchnie łączone znajdują się pod działaniem powietrza atmosferycznego. W momencie, gdy podczas montażu połączenia klej zostaje pozbawiony dopływu tlenu, wówczas rozpoczyna się proces polimeryzacji, który przebiega szybko, co dodatkowo przyspiesza kontakt z metalem. Dzięki swoim właściwościom – kapilarności – klej jest w stanie wpłynąć i wypełnić nierówności – proces utwardzania i „zakleszczania” się kleju rozpoczyna się w mikronierównościach. Dodatkowo powierzchnie metalowe mają charakter katalizatora w procesie utwardzania się kleju. Materiały pasywne mają słabe właściwości katalizujące – w celu uzyskania szybkiego i pewnego utwardzenia wymagają stosowania aktywatorów.

Kleje anaerobowe posiadają następujące właściwości:

- bardzo dużą wytrzymałość na ścinanie,
- dużą odporność na zmienny zakres temperatury pracy (od -55°C do maks. $+230^{\circ}\text{C}$),
- krótki czas utwardzania,
- łatwość dozowania,
- możliwość stosowania w liniach automatycznych,
- brak wymogu precyzyjnego przygotowania powierzchni klejonych – dopuszczalna chropowatość powierzchni wynosi od $8\ \mu\text{m}$ do $40\ \mu\text{m}$ (Rz),
- równoczesne działanie uszczelniające przy dużej odporności chemicznej,
- odporność na wibracje,
- dużą odporność na obciążenia dynamiczne.

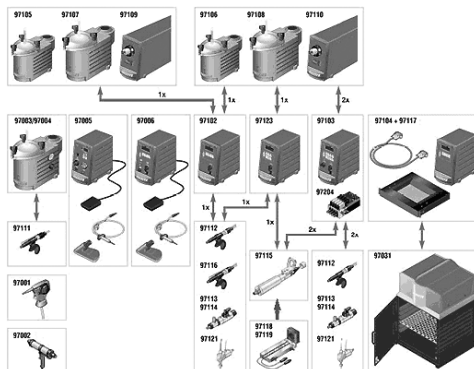
W warunkach produkcyjnych, równie ważne oprócz doboru kleju, może być zaproponowanie budowy odpowiedniej linii technologicznej. Kleje anaerobowe służą do klejenia, uszczelniania gwintów rurowych, zabezpieczania połączeń gwintowych, osadzania połączeń typu wał-piasta czy uszczelniania płaskich powierzchni. W niektórych przypadkach wystarczy wycisnąć klej bezpośrednio z tuby poprzez dyszę dozownika lub wylać z butelki i rozprowadzić go na łączonych powierzchniach. Jednak dla bardziej skomplikowanych prac konieczne jest precyzyjne i zautomatyzowane nanoszenie kleju. W tym celu konieczne może być opracowanie specjalnego systemu jego nanoszenia i dozowania, który pozwoli wykorzystać substancję oszczędniej, szybciej, do-

kładniej i w sposób pozwalający zachować większą czystość. Przykład systemu nano-
 zczenia i dozowania przedstawiono na rysunku 11.2 [5].



Rys. 11.2. Jednokanałowy automatyczny i półautomatyczny system dozowania [5]

Rodzaj aplikacji i dostępne warunki pracy, takie jak szybkość dozowania, liczba wykonywanych części na godzinę, sprawność operatora i dostępność materiału, decydują o tym, jaki system zostanie użyty: ręczny, półautomatyczny czy automatyczny. Na rysunku 11.3 przedstawiono rzeczywisty wygląd i sposób działania modułowego systemu automatycznego.



Rys. 11.3. Modułowy system automatycznej linii dozującej firmy Loctite [6]

W przypadku braku możliwości zastosowania w produkcji seryjnej dozowników automatycznych lub gdy nie jest wskazane ręczne nakładanie kleju rozwiązaniem może okazać się wstępne powlekanie śrub lub nakrętek klejem. W takich przypadkach stosuje się systemy klejów wstępnie nakładanych na powierzchnie łączone w procesie montażu, wytwarzając w ten sposób powłokę preaplikowalną. Są to najczęściej kompozycje nakładane na elementy gwintowane (śruby, złączki itp.), a następnie suszone. Po wysuszeniu tworzą nieaktywne powłoki zawierające mikrokapsułki. Podczas łączenia części mikrokapsułki pękają, wydzielając aktywną substancję, a klej zastyga, podobnie jak płynny klej anaerobowy, wykazując podobną wytrzymałość i odporność na ciecze i gazy. Tak przygotowane elementy po zmontowaniu zapewniają szczelność, a w przypadku klejów dodatkowo zabezpieczają przed poluzowaniem. Produkty do wstępnego powlekania oparte są na bazie wody, co oznacza, że nie zawierają rozpuszczalników. Nie powodują one zatem zagrożenia wystąpienia zapłonu. Posiadają łatwą do identyfikowania jasną barwę, co dodatkowo ułatwia proces montażu (rys. 11.4). Tak zabezpieczone powierzchnie mogą być poddane długiemu magazynowaniu.



Rys. 11.4. Przykłady różnych rodzajów gwintów zabezpieczonych metodą powlekania wstępnego [5]

11.5. Wytrzymałość na zerwanie połączeń śrubowych

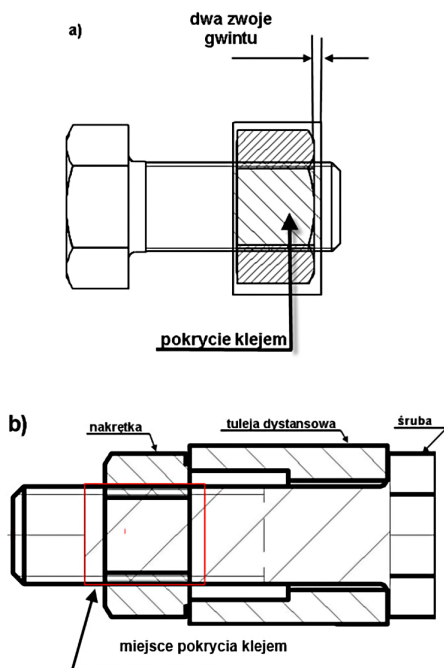
Najlepszym sposobem oceny zabezpieczenia połączenia gwintowego jest zbadanie jego zachowania pod zmiennym cyklem obciążenia w dynamicznej maszynie testującej. Im mniejszy spadek naprężenia wstępnego śruby, tym lepiej zabezpieczone połączenie. W badaniu porównawczym moment zerwania może być użyty jako miernik zwilżania gwintu klejem, jego adhezji i stopnia utwardzenia.

Wytrzymałość na zerwanie złącza śrubowego zależy od [4]:

- długości gwintu,
- stosowanych materiałów,
- jakości wykonania gwintów,
- wartości momentu naprężenia wstępnego,
- średnicy śruby.

W zależności od wartości momentu zerwania wyróżnić można połączenia gwintowe demontowane normalnymi narzędziami oraz trudne do zdemontowania.

Wartość momentu zrywającego połączenie gwintowe można określić podczas próby oznaczenia wytrzymałości na odkręcanie według normy PN-EN 15865:2009. Metoda ta polega na określeniu momentu obrotowego potrzebnego do odkręcenia połączenia klejowego nakrętki ze śrubą, czyli określenia zarówno momentu początkowego potrzebnego do zerwania złącza, jak i momentu zmierzonego po odkręceniu nakrętki o 180°. Wytrzymałość na odkręcanie określa się w przypadku połączeń nieumocowanych oraz w przypadku połączeń umocowanych, wstępnie obciążonych określonym momentem wejściowym. Na rysunku 11.5 przedstawiono układ połączenia nieumocowanego i umocowanego.



Rys. 11.5. Układ połączeń: a) nieumocowanych, b) umocowanych

11.6. Etapy zabezpieczenia połączeń śruba–nakrętka

Zabezpieczenie połączenia śruba–nakrętka składa się z następujących etapów:

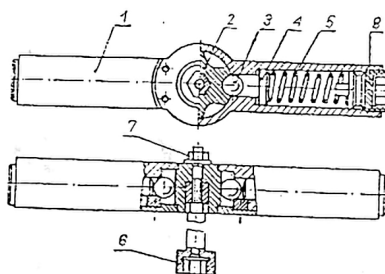
1. Wzajemne ustalenie łączonych elementów.
2. Naniesienie kleju na jedną stronę połączenia gwintowego – na powierzchnię śruby.
3. Wstępne skręcenie elementów tworzących połączenie.

4. Dokręcanie, nakręcanie lub wkręcanie śruby na określoną długość gwintu.
5. Dociąganie nakrętki.
6. Utwardzenie kleju.
7. Kontrola połączenia.

11.7. Klucze graniczne i dynamometryczne

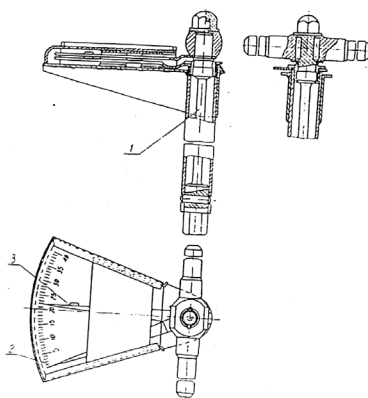
Najbardziej rozpowszechnionym sposobem dociągania nakrętek jest zastosowanie klucza granicznego lub dynamometrycznego. Klucze graniczne wyłączają się po osiągnięciu ustalonego momentu skręcającego. Klucze dynamometryczne wskazują w sposób ciągły wartość momentu skręcającego przy dociąganiu.

Konstrukcję klucza granicznego przedstawiono na rysunku 11.6.



Rys. 11.6. Klucz graniczny przeciążeniowy dwuramienny

Przykład klucza skrętnego przedstawiono na rysunku 11.7. Wartość momentu skręcającego określa się według kąta skręcanego trzpienia sprężystego 1. Kąt ten określony jest na skali 2 za pomocą wskazówki 3.



Rys. 11.7. Klucz dynamometryczny skrętny

11.8. Przebieg ćwiczenia

11.8.1. Cel ćwiczenia

Celem przeprowadzanego ćwiczenia jest zapoznanie studentów z technologią wykonywania połączeń śruba–nakrętka wraz z zabezpieczeniem w postaci kleju. Celem ćwiczenia jest także praktyczne wykonanie przykładowego połączenia śrubowego oraz oznaczenie wytrzymałości na odkręcanie połączeń gwintowych zabezpieczonych klejami anaerobowymi według normy PN-EN 15865:2009.

11.8.2. Program realizacji ćwiczenia

Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia należy wykonać następujące operacje:

1. Skompletować łączone elementy.
2. Przygotować powierzchnie do klejenia poprzez usunięcie zanieczyszczeń i odtłuszczenie.
3. Przygotować niezbędne materiały do wykonania połączenia.

Do sprawdzenia zgodności z wymogami technicznymi jako próbkę należy użyć śrubę stalową M10x38 o klasie wytrzymałości 8.8 z powłoką cynkowo-fosforanową według normy ISO 898-1 i odpowiednio nakrętkę M10 według normy ISO 898-2. Wszystkie śruby i nakrętki przed przystąpieniem do badań należy odtłuścić.

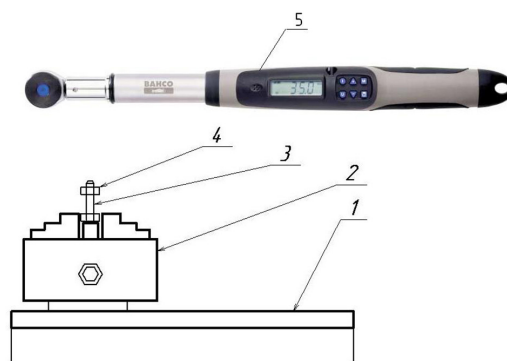
Czynności związane z wykonaniem ćwiczenia obejmują:

1. Przygotowanie powierzchni śruby i nakrętki do klejenia poprzez odtłuszczenie środkiem odtłuszczającym. W przypadku śrub używanych uprzednio w innych doświadczeniach należy usunąć najpierw zalegającą warstwę kleju za pomocą szczotki drucianej.
2. Wykonanie połączenia klejowego typu śruba–nakrętka zgodnie z następującym schematem:
 - dokonać wstępnego sprawdzenia łączonych elementów – nakrętki i śruby należy wstępnie skrócić przed nałożeniem kleju. Pary wykazujące opory podczas skręcania na skutek zadziórów lub uszkodzonych powierzchni gwintu należy odrzucić. Po sprawdzeniu połączenie rozkręcić, nanieść klej na jedną stronę połączenia gwintowego – odpowiednią warstwę kleju nałożyć na gwint śruby tak, aby całkowicie pokryć powierzchnię równą wysokości nakrętki powiększonej o dwa zwoje gwintu. Klejem pokryć także zwoje gwintu nakrętki,
 - dokonać wstępnego skręcenia połączenia – w przypadku układów nieumocowanych nakrętkę umieścić ręcznie na śrubie, tak aby dwa zwoje gwintu wystawały ponad nakrętką. Jeżeli użyto śruby z wcześniej naniesioną warstewką kleju, nakrętkę umieszczać na śrubie powleczoną klejem i zanotować moment dokręcający. Powinny wystawać dwa pokryte klejem zwoje gwintu,

- w przypadku układów umocowanych umieścić nakrętkę na śrubę ręcznie do chwili, gdy nakrętka zetknie się z tuleją dystansową. Za pomocą klucza dynamometrycznego przyłożyć moment wejściowy równy 40 Nm w celu obciążenia układu,
- zarejestrować czas utwardzania połączenia,
- dokonać kontroli połączenia,
- dokonać demontażu połączenia – zamocować łeb śruby w uchwycie mocującym i odkręcić nakrętkę ze stałą prędkością równą 2 obr/min, 5 obr/min, 10 obr/min zgodnie z zaleceniami prowadzącego zajęcia,
- zanotować moment zrywający lub luzujący oraz odkręcający (w Nm).

11.8.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 11.8) składa się z płyty podstawowej 1, do której zamocowany jest uchwyt trójszczękowy samocentrujący 2. W uchwycie znajduje się sworznień w celu ustalenia głębokości zamocowania śruby 3. Po umieszczeniu w uchwycie i dokręceniu uchwytu za pomocą klucza można przystąpić do montażu nakrętki 4 za pomocą klucza dynamometrycznego 5. Wyniki pomiarów należy przesłać ze stanowiska badawczego za pomocą interfejsu urządzenia pomiarowego na dysk komputera lokalnego w celu opracowania wyników pomiarów.



Rys. 11.8. Stanowisko badawcze do próby oznaczenia wytrzymałości na odkręcanie wg PN-EN 15865:2009

11.8.4. Sprawozdanie


Sprawozdanie powinno zawierać:

1. dane oraz niezbędne obliczenia,
2. kolejno przedstawione etapy realizacji ćwiczenia,
3. wyniki i wnioski.

Bibliografia

1. Biegus A.: *Połączenia śrubowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
2. Landrock A.H.; Ebnesajjad S.: *Adhesives Technology Handbook*. Elsevier/ William Andrew, Boston 2015.
3. Maciakowski R.: *Połączenia śrubowe: wykład z podstaw konstrukcji maszyn z ćwiczeniami rachunkowymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002.
4. Skoć A.: *Przykłady obliczeń, zadania do rozwiązania z podstaw konstrukcji maszyn. T. 1, cz. 2, Wybrane materiały konstrukcyjne, połączenia rozłączne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
5. <https://www.woronko-kleje.pl/>
6. <https://www.henkel-adhesives.com/>

Wzór sprawozdania

	POLITECHNIKA LUBELSKA WYDZIAŁ MECHANICZNY KATEDRA INFORMATYZACJI I ROBOTYZACJI PRODUKCJI	 POLITECHNIKA LUBELSKA LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SPRAWOZDANIE

Nr ćwiczenia:	
Tytuł ćwiczenia:	
Nazwa przedmiotu:	
Kierunek studiów:	
Imię i nazwisko:	

1. Cel ćwiczenia: *Należy podać zgodnie z instrukcją.*

2. Treść zadania:

Należy podać treść zadania zdefiniowanego dla Studenta.

3. Opis realizacji zadania:

Należy przedstawić przyjęte założenia, użyte narzędzia (w tym etapy modelowania), osiągnięte efekty pracy (w tym schematy, wykresy, rysunki)

4. Wnioski

Należy odnieść się do osiągniętych efektów prac. Wskazać istotne elementy wyboru i je uzasadnić.