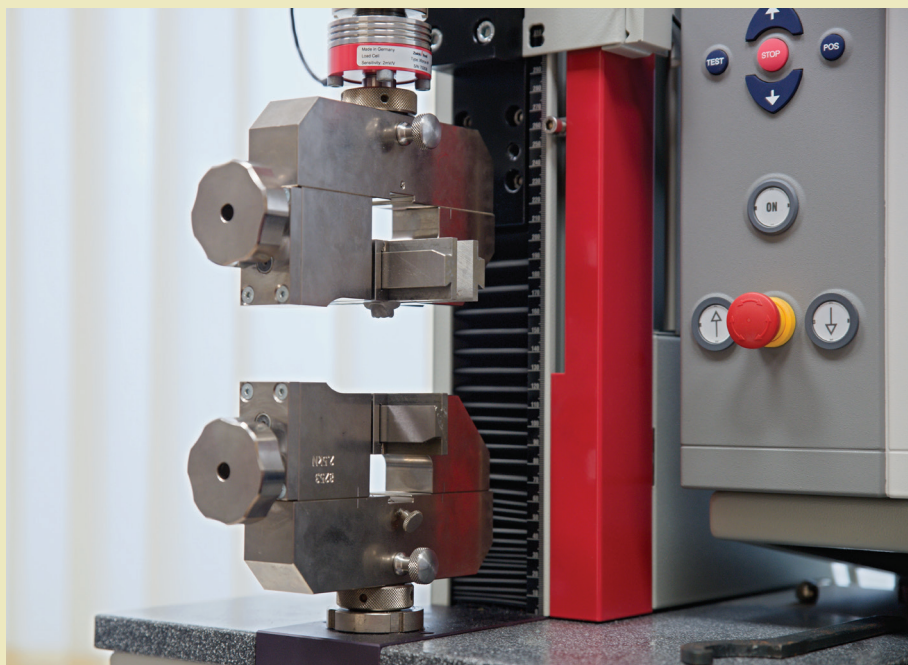




Anna Rudawska

Oprządkowanie w technologii klejenia

MONOGRAFIE



Oprzysiężowanie w technologii klejenia

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Anna Rudawska

Oprządkowanie w technologii klejenia



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Józef Kuczmazewski, Politechnika Lubelska

Redakcja i skład: Anna Rudawska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-176-8

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis Treści

Streszczenie.....	8
Abstract	9
1. Wstęp.....	10
2. Charakterystyka typowych operacji technologicznych klejenia	12
2.1. Przygotowanie powierzchni	13
2.2. Przygotowanie klejów	14
2.3. Nakładanie klejów na łączone powierzchnie	16
2.4. Ustalanie i składanie elementów	17
2.5. Utwardzanie spoiny klejowej	18
2.6. Kontrola połączeń klejowych	22
3. Oprzyrządowanie w technologii klejenia	25
3.1. Funkcje oprzyrządowania w technologii klejenia	25
3.2. Wytyczne doboru oprzyrządowania w technologii klejenia	26
3.2.1. Rodzaj i geometria połączeń	26
3.2.2. Rodzaj produkcji	27
3.2.3. Rodzaj i właściwości kleju	27
3.2.4. Sposób montażu połączeń klejowych	28
3.3. Wskazówki do projektowania przyrządów klejarskich	29
3.4. Przygotowanie powierzchni elementów oprzyrządowania	30
4. Przygotowanie powierzchni łączonych elementów	34
4.1. Odłuszczenie (oczyszczanie chemiczne)	34
4.2. Oczyszczanie w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej	36
4.3. Płukanie	36
4.4. Suszenie	39
4.5. Obróbka powierzchni	41

4.5.1. Metody mechaniczne.....	41
4.5.2. Metody chemiczne i elektrochemiczne	42
4.5.3. Metoda plazmowa	44
4.5.4. Metoda wyładowań koronowych	44
4.5.5. Metoda płomieniowa.....	46
4.5.6. Inne metody – obróbka powierzchni materiałów polimerowych z wykorzystaniem różnych rodzajów promieniowania.....	47
4.6. Nakładanie gruntów.....	48
5. Przygotowanie i nakładanie klejów.....	50
5.1. Charakterystyka procesu przygotowania i nakładania klejów	50
5.2. Rodzaje i właściwości klejów	52
5.3. Charakterystyka urządzeń do mieszania klejów.....	54
5.4. Charakterystyka urządzeń do dozowania klejów	60
5.5. Charakterystyka urządzeń do nakładania klejów	68
5.5.1. Sposoby nakładania klejów w różnej postaci.....	68
5.5.2. Ręczne i automatyczne nakładanie klejów.....	75
6. Ustalanie i składanie łączonych elementów	86
6.1. Kryteria ustalania i łączenia elementów	86
6.2. Elementy ustalające	87
6.3. Przyrządy do ustalania i składania łączonych elementów	91
7. Utwardzanie spoiny klejowej	99
7.1. Czynniki wpływające na proces utwardzania.....	99
7.2. Urządzenia stosowane w procesie utwardzania	99
8. Kontrola wykonania połączeń klejowych	109
8.1. Metody kontroli połączeń klejowych	109
8.2. Urządzenia stosowane podczas kontroli połączeń klejowych....	110

8.2.1. Metoda wizualna	110
8.2.2. Metoda penetracyjna	112
8.2.3. Metoda ultradźwiękowa	113
8.2.4. Metoda emisji akustycznej	115
8.2.5. Metoda radiologiczna	118
8.2.6. Metoda holografii laserowej.....	120
8.2.7. Metoda termograficzna	123
9. Operacje pomocnicze	126
9.1. Urządzenia grzejne	126
9.2. Przyrządy wykorzystywane do obróbki wykończeniowej	128
10. Zakończenie	132
Literatura	134

Streszczenie

Proces wykonywania połączeń klejowych wymaga stosowania specjalistycznego oprzyrządowania klejarskiego. Oprzyrządowanie wykorzystuje się we wszystkich operacjach technologicznych klejenia, a jego charakterystyka i różnorodność uzależniona jest przede wszystkim od rodzaju operacji klejarskiej. Właściwy jego wybór oraz poprawne zastosowanie w znacznym stopniu wpływa na jakość wykonanych połączeń klejowych. Wśród podstawowych funkcji oprzyrządowania wykorzystywanego w procesie klejenia wymienia się: dozowanie oraz mieszanie poszczególnych składników kleju, powleknięcie powierzchni klejem, wywieranie odpowiedniego nacisku na klejone elementy, wytworzenie oraz utrzymanie odpowiedniej temperatury klejenia, odpowiednie ustalenie oraz zamocowanie łączonych elementów, ułatwienie procesów kontroli połączeń.

Najczęściej stosowane w procesie klejenia oprzyrządowanie klasyfikuje się jako specjalne lub specjalizowane. W zależności od specyfiki technologii wykonywania połączeń klejowych, każdorazowo jest konieczny właściwy jego dobór lub też często występuje konieczność zaprojektowania oraz wykonania tego oprzyrządowania. Ze względu na powszechność stosowania klejenia w wielu branżach, urządzenia oraz przyrządy są przeznaczone do konkretnych zastosowań, zarówno o prostej, jak i złożonej konstrukcji. Jednakże ze względu na cechy procesu klejenia, a zwłaszcza poszczególnych operacji klejenia, często są stosowane urządzenia lub przyrządy specjalne, dostosowane do określonego rodzaju, wielkości i kształtu połączeń klejowych, rodzaju produkcji i innych czynników.

W niniejszym opracowaniu zamieszczono krótką charakterystykę poszczególnych etapów klejenia, funkcje oprzyrządowania oraz wytyczne doboru oprzyrządowania technologicznego, wskazując na czynniki mające istotne znaczenie podczas wyboru oraz konstruowania oprzyrządowania klejarskiego. Przedstawiono również wybrane urządzenia stosowane podczas poszczególnych etapów procesu klejenia, takich jak: przygotowanie powierzchni, przygotowanie i nakładanie kleju, ustalanie i składanie łączonych elementów, utwardzanie kleju oraz kontrola połączeń klejowych.

Dynamiczny rozwój technologii klejenia wymusza konstruowanie i wykonywanie nowoczesnego oprzyrządowania klejarskiego, które często stosowane jest w liniach produkcyjnych zautomatyzowanych.

Abstract

The process of preparing bonding joints requires the use of specialized bonding equipment. Equipment is used in all technological bonding operations and its characteristics and diversity are depending on the type of bonding operation. Proper its choice and correct application significantly affects the quality of bonding joints. Among the basic functions of equipment used in the process of bonding lists: dosing and mixing of the components of the adhesive, coating the surface of the adhesive, exerting appropriate pressure on the joined elements, creating and maintaining a suitable curing temperature, appropriate fixing and assembly of the joined elements, facilitation the control process.

Most of equipment is classified as special or specialized. Depending on the specifics of the bonding technology, each time it is necessary to their appropriate selection. There is often a need for their design and manufacturing.

Because of the universality of application of the bonding in some industries are manufactured the equipment and instruments designed for specific applications, both simple and complex construction. However, due to the specificities of the bonding process, and especially the individual bonding operations are often used equipment or special instruments, adapted to a specific type, size and shape of the bonding joints, type of production and other factors.

In this study provide a brief characterization of the individual stages of the bonding, the functions, and the selection of technological equipment, pointing out the important factors when selecting and constructing bonding equipment. Also shows the selected equipment used during the various stages of the process of bonding, such as: surface treatment, preparation and application of adhesives, fixing and fastening of the joined elements, the curing process of the adhesive and bonding joints control.

Dynamic development of the bonding technology forces to build and manufacturing modern bonding equipments, which is often used in automated production lines.

1. Wstęp

Klejenie jest sposobem trwałego łączenia elementów w różnorodnych konstrukcjach coraz częściej stosowaną we współczesnym przemyśle. Metoda ta ulega systematycznemu rozwojowi ze względu zarówno na rozwój fizykochemii tworzyw polimerowych, jak i rozwój techniki oraz technologii wykonywania połączeń klejowych. Klejenie materiałów konstrukcyjnych znajduje coraz większe zastosowanie we współczesnej technice, wprowadzane są nowe rozwiązania konstrukcyjne połączeń klejowych, udoskonalane są kleje i sposoby przygotowania powierzchni materiałów do klejenia tak, aby wytrzymałość i trwałość tych połączeń była jak największa [4,20,21,36,44]. Technologia klejenia posiada szerokie spektrum zastosowania w takich branżach przemysłu, jak: sektor lotniczy, samochodowy, maszynowy oraz budowlany.

Coraz powszechniejsze zastosowanie tej technologii wynika z wielu zalet połączeń klejowych [12,24,44]. Zalicza się do nich: niskie koszty jednostkowe tej technologii, co wiąże się również z niskimi kosztami produkcji lub montażu konstrukcji, maszyn lub urządzeń. Zastosowanie klejenia przyczynia się do zmniejszenia masy konstrukcji. Wśród zalet połączeń klejowych wymienia się również możliwość klejenia elementów o dowolnych kształtach i wymiarach oraz możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych i mechanicznych. Zaletą tej technologii jest również odporność połączeń klejowych na korozję, która występuje często podczas łączenia metali innymi sposobami, zdolność tłumienia drgań, czy też wykorzystanie właściwości uszczelniających. Podczas wykonywania połączeń klejowych nie występuje konieczność wykonywania otworów, dzięki czemu zmniejsza się ryzyko osłabienia materiału, a także występuje bardziej równomierny rozkład naprężeń, niż w przypadkach innych połączeń, np. nitowych, czy śrubowych, gdzie naprężenia koncentrują się wokół otworów. Czyni to połączenia klejowe bardziej odporne na wibracje oraz deformacje. W porównaniu do spawania, klejenie nie wywołuje zmian strukturalnych łączonych materiałów, a także w miejscu łączenia nie występuje wysoka temperatura, mogąca być przyczyną powstawania odkształceń cieplnych.

Do wad połączeń klejowych należy niewielka odporność kleju na wahania temperatury, co ma wpływ m.in. na wytrzymałość połączenia, długi czas utwardzania większości klejów oraz możliwość rozwarstwienia się połączeń pod wpływem obciążeń [17]. Ograniczeniem stosowania połączeń klejowych jest również fakt, że spoiny klejowe ulegają procesowi degradacji, pod wpływem różnorodnych czynników, takich jak np.: promieniowanie, temperatura, czas.

Proces wykonywania połączeń klejowych obejmuje kilka operacji, charakteryzujących się określonymi parametrami [9,17,24,58].

Rodzaj oraz wybór technik i metod wykonywania poszczególnych etapów jest zależny od wielu czynników, wśród których wyróżnia się m.in.:

- rodzaj łączonego materiału i jego właściwości,
- rodzaj kleju: jego właściwości, sposób utwardzania,
- cechy konstrukcyjne połączenia: wymiary, kształt, rodzaj połączenia, położenie połączenia klejowego w konstrukcji;
- rodzaj produkcji,
- metoda montażu oraz warunki montażowe (produkcyjne).

Wymienione cechy w istotny sposób wpływają także na dobór oprzyrządowania oraz urządzeń i maszyn stosowanych podczas wykonywania połączeń klejowych. Najczęściej oprzyrządowanie klasyfikuje się, jako specjalne lub specjalizowane. Ze względu na specyfikę technologii wykonywania połączeń klejowych, każdorazowo jest konieczny jego właściwy dobór. Często też występuje konieczność zaprojektowania oraz wykonania przyrządów specjalnych. Ze względu na powszechność stosowania klejenia w niektórych branżach, produkowane są urządzenia dedykowane do określonych zastosowań. Nie mniej jednak specyfika klejenia często wymusza zastosowanie urządzeń lub przyrządów specjalnych, dostosowanych do określonego rodzaju, wielkości i kształtu połączeń klejowych.

Specjalistyczne oprzyrządowanie klejarskie jest wykorzystywane we wszystkich fazach technologicznych, a właściwy jego wybór oraz poprawne zastosowanie w znacznym stopniu wpływa na jakość projektowanych połączeń klejowych. Do podstawowych funkcji oprzyrządowania wykorzystywanego w procesie klejenia zalicza się przede wszystkim [30,42]:

- dozowanie oraz mieszanie poszczególnych składników kleju,
- powleknięcie powierzchni klejem,
- wywieranie odpowiedniego nacisku na klejone elementy,
- wytworzenie oraz utrzymanie odpowiedniej temperatury klejenia,
- odpowiednie ustalenie oraz zamocowanie łączonych elementów,
- ułatwienie procesów kontroli połączeń.

W niniejszym opracowaniu zostały opisane wybrane urządzenia stosowane podczas poszczególnych etapów procesu klejenia. Wiele przedsiębiorstw, zwłaszcza produkujących lub dystrybuujących kleje, posiada w swojej ofercie także oprzyrządowanie klejarskie dedykowane do określonych właściwości i często o charakterystycznej konstrukcji dla danej firmy [76,104,106,107,117].

2. Charakterystyka typowych operacji technologicznych klejenia

Proces technologiczny klejenia składa się z wielu operacji, które umożliwiają wykonanie zaprojektowanego połączenia klejowego. Zalicza się do nich: przygotowanie powierzchni do klejenia, przygotowanie i nakładanie kleju, ustalanie i składanie elementów, utwardzanie spoiny klejowej, kontrola połączeń klejowych oraz operacje wykończeniowe [9, 12, 17, 43].



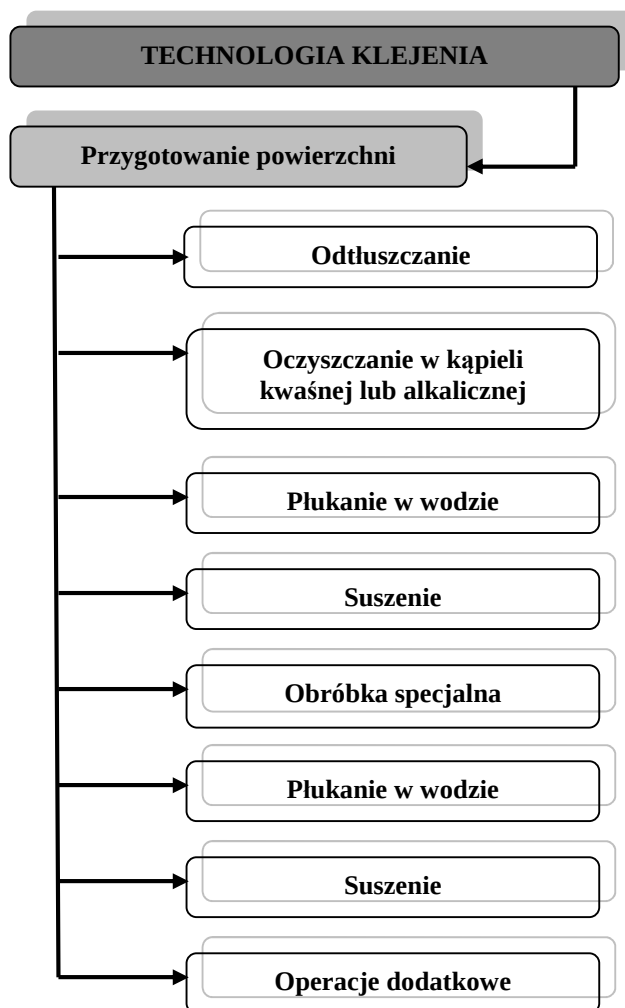
Rys. 2.1. Operacje procesu technologicznego klejenia

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17, 24]

Wymienione operacje mogą zostać zrealizowane za pomocą różnych metod i środków, a także przy wykorzystaniu wielu różnorodnych (często specjalnych) urządzeń oraz specjalnego lub specjalizowanego oprzyrządowania.

2.1. Przygotowanie powierzchni

Odpowiednie przygotowanie powierzchni materiałów jest istotnym warunkiem uzyskania połączeń klejowych o określonych właściwościach [24, 31, 42, 49, 61]. W wyniku przygotowania powierzchni powinno wystąpić działanie wszystkich mechanizmów wiążących, zarówno natury fizycznej, w tym typowo mechanicznej, jak i chemicznej [12, 17].



Rys. 2.2. Przykład procesu przygotowania powierzchni do klejenia

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [24, 57]

Ten pierwszy etap technologii klejenia powinien zapewnić uzyskanie jak najsilniejszych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym. W tym celu należy m.in. [16, 24, 47]:

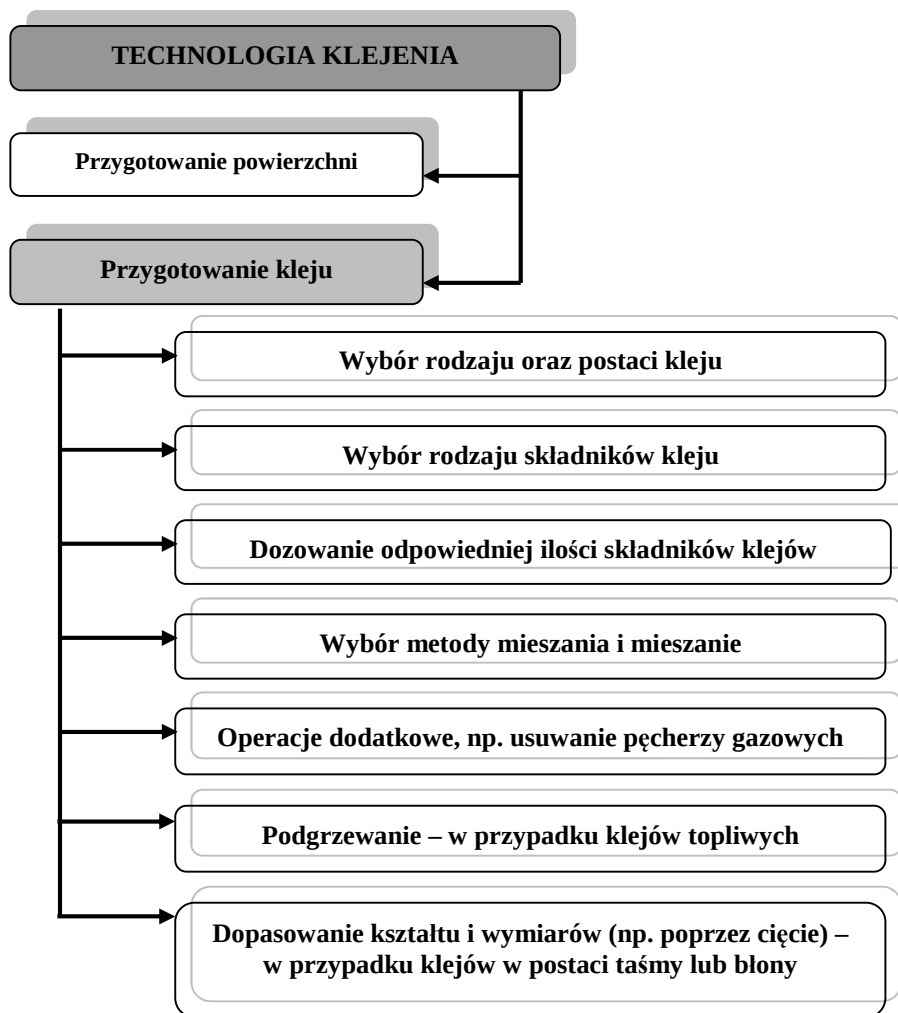
- usunąć zanieczyszczenia z powierzchni łączonych elementów (m.in. pyły, tłuszcze, smary, mikroorganizmy, pęcherzyki gazów, luźno związane warstwy korozyjne),
- uzyskać właściwe rozwinięcie geometryczne powierzchni materiałów łączonych,
- uzyskać dobre uaktywnienie powierzchni materiałów łączonych.

Proces przygotowania powierzchni może być złożony z różnych operacji (rys. 2.2). Wybór sposobów przygotowania powierzchni do klejenia zależy od wielu czynników, między innymi od rodzaju, właściwości i struktury stereometrycznej powierzchni klejonych materiałów, właściwości i kształtu łączonych elementów, a także warunków techniczno-technologicznych oraz rodzaju produkcji [9, 12, 17, 27, 43].

2.2. Przygotowanie klejów

Proces przygotowania klejów jest zależny od wielu czynników związanych zarówno z rodzajem klejów, ilością składników, postacią kleju, sposobem dozowania i wielu innych [10, 24, 30, 42].

Kleje wieloskładnikowe (najczęściej kleje w postaci ciekłej lub półpłynnej) złożone są z wielu składników, m.in.: z żywicy (substancji klejącej), utwardzacza, aktywatora lub katalizatora procesu sieciowania, substancji modyfikujących i innych składników. Przed naniesieniem na łączone powierzchnie wymienione składniki należy połączyć i wymieszać, aby uzyskać kompozycję (masę) klejową [24, 41]. Ponadto w przypadku klejów topliwych, które występują w postaci m.in. taśm, granulek, prętów przed naniesieniem na klejone powierzchnie, należy je podgrzać. Nanoszenie klejów topliwych może odbywać się za pomocą ogrzanych walców lub poprzez wytłaczanie stopionego kleju. Przykładowe czynności występujące w procesie przygotowywania klejów zamieszczono na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Przykładowe czynności w procesie przygotowania kleju

Źródło: Opracowanie własne

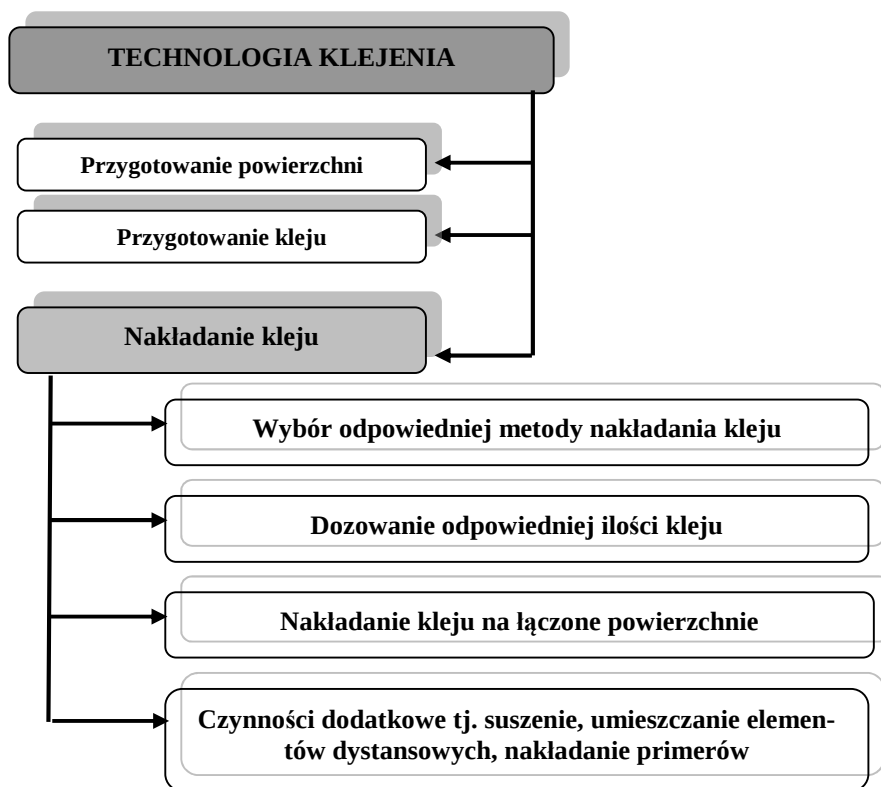
Zagadnienia dotyczące przygotowania i nakładania klejów zostały przedstawione w rozdziale 5.

2.3. Nakładanie klejów na łączone powierzchnie

Sposób nakładania kleju jest uzależniony od wielu czynników, wśród których można wymienić m.in. [9, 12, 24, 30, 42, 60]:

- postać kleju (ciecz, błona, granulki i inne),
- właściwości kleju, a zwłaszcza lepkość kleju,
- ilość składników,
- dostępność do wykonywanego połączenia klejowego,
- metoda montażu,
- rodzaj produkcji.

Przykładowe czynności w operacji nakładania kleju zamieszczono na rys. 2.4.



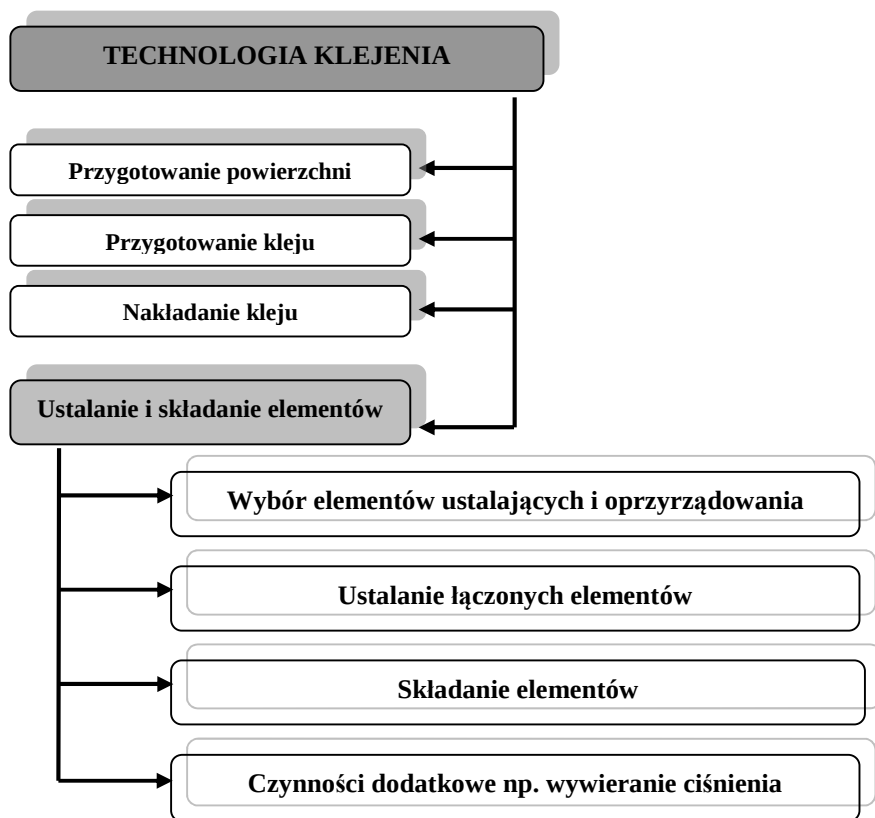
Rys. 2.4. Przykładowe czynności w procesie nakładania kleju

Źródło: Opracowanie własne

Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń wykorzystywanych w procesie nakładania klejów, których przykłady zaprezentowano w rozdziale 5, przy czym ich konstrukcja zależy od czynników wymienionych powyżej.

2.4. Ustalanie i składanie łączonych elementów

W celu poprawnego wykonania połączenia klejowego konieczne jest dokładne i staranne złożenie oraz ustalenie powierzchni sklejanych elementów. Jednym z wymagań technologicznych, jakie powinno spełnić przygotowanie powierzchni klejonych elementów, jest przywieranie powierzchni ich styku bez wywierania dużych nacisków. Przykładowe czynności w operacji ustalania i składania łączonych elementów przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Przykładowe czynności operacji ustalania i składania elementów

Źródło: Opracowanie własne

Ustawienie klejonych elementów do określonego położenia przeprowadza się najczęściej za pomocą specjalnych przyrządów. Są one wyposażone w odpowiednie elementy ustalające oraz dociskowe, które zapewniają niezmienną pozycję łączonych elementów w trakcie utwardzania spoiny klejowej oraz wytworzenie odpowiedniego nacisku. Ponadto takie przyrządy zapewniają uzyskanie powtarzalności wymiarowej wykonywanych połączeń klejowych.

2.5. Utwardzanie spoiny klejowej

Utwardzanie jest to proces powstawania wytrzymałej i nierozpuszczalnej spoiny klejowej. Zachodzi on wskutek sieciowania żywicy (lub monomeru) w wyniku działania utwardzacza, katalizatora lub też podwyższonej temperatury. Kleje anaerobowe (najczęściej jednoskładnikowe) utwardzają się przez odcięcie dostępu tlenu. W przypadku klejów rozpuszczalnikowych spoina klejowa powstaje na skutek odparowania rozpuszczalnika (np. wody, alkoholu lub rozpuszczalników organicznych).

Do parametrów technologicznych utwardzania spoiny klejowej należą (rys. 2.6) [17, 24, 25, 41]:

- nacisk (ciśnienie utwardzania),
- temperatura utwardzania,
- czas utwardzania.

W przypadku klejów rozpuszczalnikowych istotnymi parametrami procesu utwardzania są:

- tzw. czas schnięcia otwartego (*open time*), czyli czas potrzebny do częściowego odparowania rozpuszczalnika,
- czas docisku (*set time*),
- temperatura otoczenia,
- intensywność cyrkulacji powietrza,
- przepuszczalność łączonych materiałów (zdolność wchłaniania rozpuszczalnika).

Nacisk jest jednym z parametrów technologicznych utwardzania spoiny klejowej. Dobór nacisków klejenia uzależniony jest m.in. od [12, 17, 24]:

- rodzaju i właściwości kleju, m.in. od jego gęstości, lepkości, skurczu termicznego, chemicznego skurczu utwardzania,
- rodzaju sklejanых materiałów,
- sposobu przygotowania powierzchni elementów do klejenia,
- kształtu łączonych elementów,
- umiejscowienia połączenia w konstrukcji.

Ciśnienie w procesie klejenia sprzyja procesowi zwilżania, zwłaszcza przy wypełnianiu mikroporów i mikronierówności powierzchni. Ułatwia rozprowadzanie kleju oraz jednoznaczne ustalanie łączonych elementów. Nacisk powinien zapewnić dokładne przyleganie do siebie łączonych elementów oraz optymalną grubość spoiny (0,05 – 0,20 mm) [12, 16].

W wielu przypadkach zbyt duża siła docisku lub niewłaściwe rozmieszczenie elementów dociskowych w obszarze klejenia może doprowadzić do deformacji łączonych konstrukcji. 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 grubej i najczęściej porowatej spoiny. W obu przypadkach otrzymuje się połączenie klejowe o mniejszej wytrzymałości [17].

Wartość nacisków klejenia uzależniona jest przede wszystkim od skurczu utwardzania kleju. Gdy skurcz ten jest mały (rzędu części procenta) naciski są niewielkie i nie przekraczają z reguły 0,1 MPa (naciski kontaktowe). Jeżeli skurcz utwardzania jest duży (rzędu kilku procent), ich wartość może wahać się w granicach 0,5–2,0 MPa [24].

Czas utwardzania związany jest 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.

Wartość temperatury utwardzania decyduje o tym, czy proces przebiega na zimno (w temperaturze otoczenia $< 30^{\circ}\text{C}$), na ciepło ($t = 31\text{--}99^{\circ}\text{C}$) czy na gorąco ($t > 100^{\circ}\text{C}$), (rys. 2.6) [17]. Maksymalną wytrzymałość połączenia klejowego uzyskuje się przy optymalnej temperaturze utwardzania charakterystycznej dla danego kleju. Jej wartość podawana jest najczęściej przez producenta.

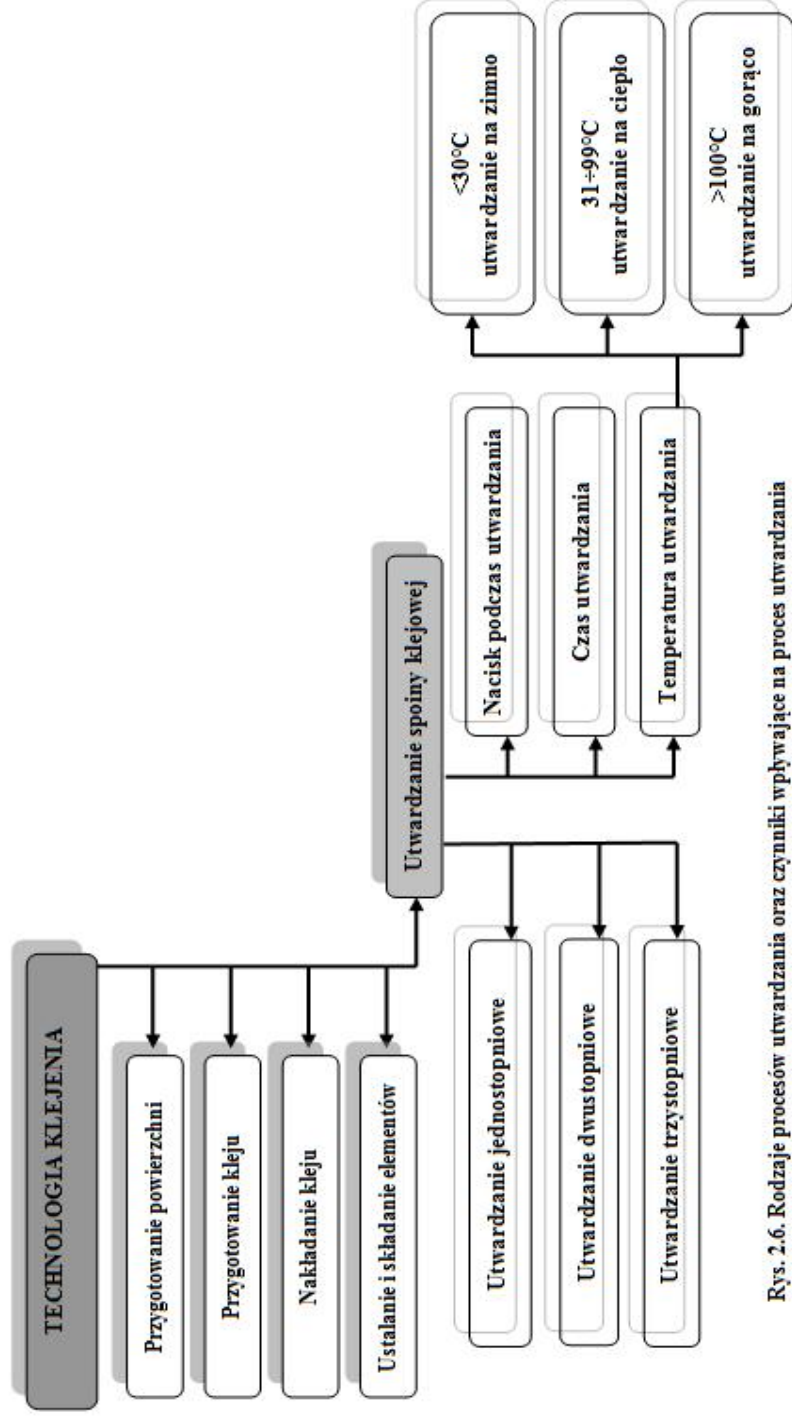
W zależności od sposobu utwardzania kleje można podzielić na następujące grupy:

- utwardzane w wyniku reakcji anaerobowej,
- utwardzane w wyniku reakcji naświetlania promieniami UV,
- utwardzane w wyniku reakcji anionowej (np. cyjanokrylany),
- utwardzane poprzez dodanie aktywatorów (np. akrylany modyfikowane),
- utwardzane wilgocią (np. silikony, uretany),
- utwardzane na gorąco (np. kleje epoksydowe).

Kleje utwardzane anaerobowo są substancjami jednoskładnikowymi utwardzającymi się w temperaturze pokojowej przy wyeliminowaniu kontaktu z tlenem. Zawarty w kleju utwardzacz aktywizuje się w momencie, kiedy spoina klejowa pozbawiona zostaje dopływu tlenu atmosferycznego, szczególnie przy równoczesnym kontakcie z metalem podczas montażu części.

Sieciovanie żywicy w klejach utwardzanych światłem UV zależy przede wszystkim od natężenia i długości fali światła. Padające promieniowanie powoduje rozszczepianie substancji inicjujących polimeryzację substancji klejowej (tzw. fotoinicjatorów), wpływając na powstawanie wiązań między cząsteczkami kleju.

Kleje utwardzane w wyniku reakcji anionowej ulegają polimeryzacji podczas kontaktu z powierzchniami alkalicznymi. Zawarty w masie klejowej stabilizator, neutralizuje poziom wilgoci na powierzchni łączonych materiałów, utrzymując ją w określonym przedziale. Zapewnienie poziomu wilgoci masy klejowej rzędu 40–60%, gwarantuje odpowiednią wytrzymałość łączonych powierzchni.

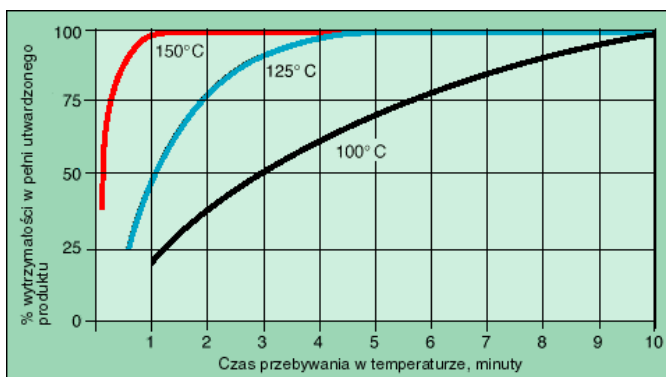


Rys. 2.6. Rodzaje procesów utwardzania oraz czynniki wpływające na proces utwardzania

Zródło: Opracowanie własne

Proces utwardzania aktywatorami umożliwia rozpoczęcie przebiegu polimeryzacji masy klejowej dopiero w momencie doprowadzenia substancji aktywującej, zapewniając montaż części maszyn w szerokim zakresie temperatur.

Utwardzanie na gorąco odnosi się głównie do spoin wykonanych z klejów epoksydowych. Temperatura utwardzania zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanego kleju i przyjmowana jest minimalnie około 100°C. Na czas utwardzania tego typu połączeń wpływ ma temperatura utwardzania. Jest on tym krótszy im wyższa jest temperatura utwardzania. Zależność między czasem utwardzania, a temperaturą utwardzania spoiny klejowej w przypadku klejów utwardzanych na gorąco przedstawiono na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Zależność między czasem utwardzania a temperaturą utwardzania spoiny klejowej w przypadku klejów utwardzanych na gorąco [106]

Utwardzanie spoin klejowych może być przeprowadzane dwuetapowo. W pierwszym etapie utwardzanie wykonywane jest na zimno, a następnie przez krótki okres w temperaturze podwyższonej (utwardzanie na ciepło lub na gorąco). Drugi okres utwardzania dwustopniowego określany jest, jako dotwardzanie spoiny klejowej. W pierwszym etapie spoinę doprowadza się do zestalenia w temperaturze otoczenia (15–20°C) pod odpowiednimi dla danego rodzaju kleju naciskami utwardzania. Zestalony klej osiąga w tym czasie około 60–70% swojej wytrzymałości końcowej. W drugim etapie spoina klejowa jest już ostatecznie utwardzona bez stosowania nacisków utwardzania. Polega on na najczęściej kilkugodzinnym przetrzymywaniu połączenia klejowego w temperaturze podwyższonej (50–100°C), po którym to czasie spoina połączenia osiąga pełną wytrzymałość oraz pełne utwardzenie. Dzięki utwardzaniu dwustopniowemu kilkakrotnie skraca się czas całkowitego utwardzania spoiny w porównaniu z utwardzaniem w temperaturze otoczenia [17].

Dla klejów utwardzanych na zimno oprócz utwardzania dwustopniowego, przeprowadza się także utwardzanie jednostopniowe w temperaturze podwyższonej. Proces utwardzania termicznego przeprowadza się w temperaturze 60–120°C, pod odpowiednimi naciskami utwardzania. W stosunku do utwardzania dwustopniowego zapewnia on kilka, a nawet kilkunastokrotne skrócenie czasu utwardzania.

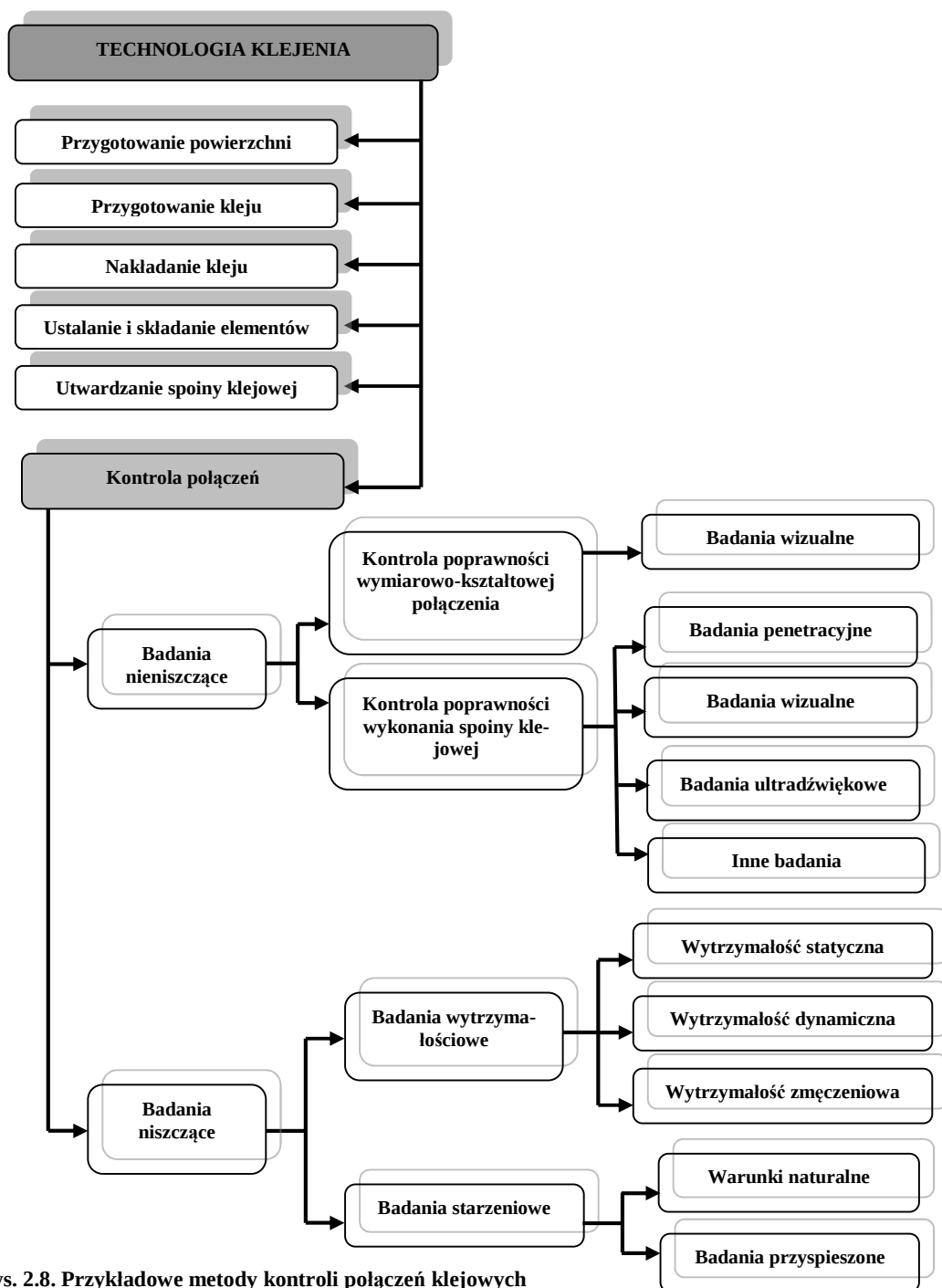
Utwardzanie klejów na gorąco odbywa się w trzech etapach. Pierwszym etapem jest doprowadzenie kleju do temperatury utwardzania. Czas tego etapu oraz intensywność nagrzewania uzależnione są od masy klejonej konstrukcji oraz rodzaju połączenia klejowego. Drugim etapem jest przetrzymanie kleju w temperaturze utwardzania, które najczęściej przeprowadza się w autoklawach z elektronicznymi układami programowania i sterowania parametrów cyklu klejenia. Trzecim etapem utwardzania klejów na gorąco jest powolne schładzanie do temperatury pokojowej, gdzie istotnym czynnikiem jest czas schładzania. Ustala się go najczęściej doświadczalnie. Powinien być na tyle długi, aby nie powstawały naprężenia skurczowe i na tyle krótki, aby nie wydłużać cyklu produkcyjnego. Najczęściej wynosi kilkanaście minut [16, 17].

2.6. Kontrola połączeń klejowych

Proces kontroli połączeń klejowych składa się z wielu operacji, podczas których sprawdzaniu jest poddawanych wiele czynników związanych z wykonywaniem połączeń oraz połączeń już wykonanych. Procesy klejenia zaliczane są do procesów specjalnych i w związku z tym jest konieczne specjalne podejście do procesu klejenia, uwzględniające konieczność zastosowania wielu różnych metod badań w celu kontroli połączenia oraz procesu wykonywania tego rodzaju połączeń [34, 37, 70]. Najczęściej jest wymagana kompleksowa kontrola połączeń klejowych obejmująca, m.in. (rys. 2.8) [1, 2, 12, 29, 58]:

- ocenę wizualną poprawności wymiarowo-kształtowej połączenia (okiem nieuzbrojonym lub z wykorzystaniem odpowiedniego oprzyrządowania),
- ocenę poprawności wykonania spoiny klejowej (wykrywanie wad w samej spoinie klejowej),
- badania wytrzymałościowe,
- badania eksploatacyjne.

Proces całościowej kontroli połączeń klejowych powinien obejmować oględziny zewnętrzne, badania jakości klejenia metodami nieniszczącymi (wykrywanie wad w spoinach klejowych) oraz badania wytrzymałości, wykonane na próbkach-świadkach (badania niszczące).



Rys. 2.8. Przykładowe metody kontroli połączeń klejowych

Źródło: Opracowanie własne

Podczas stosowania metod nieniszczących nie następuje zniszczenie lub uszkodzenie połączenia oraz łączonych materiałów. Jednak nie wszystkie metody można wykorzystać podczas kontroli połączeń klejowych. W wielu publikacjach scharakteryzowano poszczególne metody nieniszczące [2, 14, 17, 38, 45, 66].

Badania związane z poprawnością wykonania połączenia klejowego mają za zadanie głównie lokalizację i określenie pola niedoklejeń, wykrycie wad technologicznych takich jak: pęcherze gazowe, wtrącenia zanieczyszczeń, porowatość, zmienność grubości warstwy kleju, nieciągłość warstwy klejowej, odwarstwienia elementów sklejaných, a także określenie szczelności połączeń. Wśród badań nieniszczących można wyróżnić następujące metody i techniki [2, 9, 17, 33, 34, 45, 51]:

- wizualne,
- ultradźwiękowe,
- akustyczne,
- radiograficzne,
- termograficzne,
- holograficzne i inne.

W zależności od zastosowanej metody stosowane są różne przyrządy oraz urządzenia, których opis zamieszczono w rozdziale 8, prezentując także czynniki wpływające na wybór metody zarówno niszczącej, jak i nieniszczącej.

3. Oprzyrządowanie w technologii klejenia

3.1. Funkcje oprzyrządowania

Podczas wykonywania poszczególnych etapów klejenia, wykorzystywane są różnorodne środki technologiczne, stosowane są różne parametry procesów oraz metody wykonywania poszczególnych czynności. Oprzyrządowanie występuje w każdej operacji procesu technologicznego klejenia i spełnia różnorodne funkcje, takie jak [42]:

- ułatwienie i/lub umożliwienie właściwego przygotowania powierzchni łączonych elementów, w tym możliwość prowadzenia procesu odłuszczenia, obróbki mechanicznej, chemicznej, elektrochemicznej oraz obróbek specjalnych, a także procesu płukania oraz suszenia, w tym nakładanie primerów (środków proadhezyjnych) na klejone powierzchnie,
- dozowanie i mieszanie składników klejów,
- dozowanie i nakładanie kleju na łączone powierzchnie,
- wywieranie i utrzymywanie właściwego nacisku na łączone powierzchnie,
- ustalanie klejonych elementów w określonym położeniu względem siebie,
- utrzymywanie odpowiedniej temperatury w procesie utwardzania,
- utrzymywanie określonych warunków sezonowania,
- umożliwianie i/lub ułatwianie kontroli wykonanych połączeń.

Przedstawione funkcje oprzyrządowania umożliwiają oraz wspomagają proces poprawnego wykonywania połączeń klejowych o założonych wymaganiach. Oprzyrządowanie klejarskie jest niezbędne podczas montażu połączeń klejowych w różnych typach produkcji. W produkcji jednostkowej najczęściej wykorzystywane jest proste oprzyrządowanie, często znormalizowane, stosowane w montażu innych rodzajów połączeń, chociaż niekiedy występuje konieczność zastosowania oprzyrządowania specjalnego. Wynika to przede wszystkim ze specyfiki operacji i czynności procesu klejenia. W produkcji seryjnej stosuje się zarówno oprzyrządowanie znormalizowane, jak i specjalne (czy też specjalizowane). Zastosowanie oprzyrządowania specjalnego jest związane z kosztami zarówno zaprojektowania tego oprzyrządowania, jak i wykonania. Dlatego też częściej stosowane jest w produkcji seryjnej, gdyż jest to wówczas ekonomicznie uzasadnione.

3.2. Wytyczne doboru oprzyrządowania w technologii klejenia

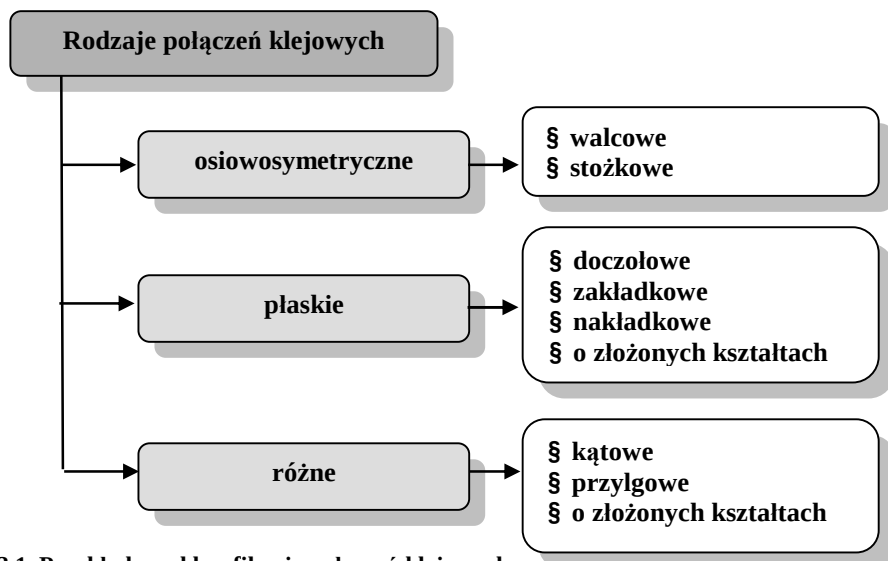
Wybór rodzaju oprzyrządowania (m.in. konstrukcji, sposobu działania) determinują różnorodne czynniki, które można pogrupować w następująco:

- rodzaj połączenia,
- parametry geometryczne połączenia i łączonych elementów: rozmiar powierzchni sklejenia, kształt łączonych elementów, umiejscowienie połączenia i spoiny klejowej w konstrukcji,
- rodzaj produkcji,
- sposób montażu,
- gatunek kleju (skład chemiczny, ilość składników, postać, lepkość, skurcz utwardzania, czas życia),
- sposób utwardzania.

Wymienione czynniki powinny zostać uwzględnione na etapie opracowywania technologii klejenia, gdyż m.in. wybór oprzyrządowania wpływa na czas, poprawność oraz koszty wykonania połączeń klejowych. Jedną ze składowych kosztów wykonania połączenia klejowego jest koszt zakupu lub użycia podczas klejenia oprzyrządowania oraz koszt wykonania przyrządów klejarskich.

3.2.1. Rodzaj i geometria połączeń

Konstrukcja połączenia wpływa na wybór zarówno elementów do ustalania łączonych części, jak również na rozwiązania konstrukcyjne urządzeń do nakładania klejów [58].



Rys. 3.1. Przykładowa klasyfikacja połączeń klejowych

Źródło: Opracowanie własne

Istnieje wiele różnych kształtów połączeń klejowych, których klasyfikację ze względu na kształt i wzajemne ustawienie elementów, przedstawiono na rys. 3.1.

W przypadku połączeń klejowych blach najczęściej stosowanymi w różnych odmianach konstrukcyjnych są połączenia zakładkowe (m.in. ze względu na prostotę konstrukcji). Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne połączeń zakładkowych (jednozakładkowych, nakładkowych i inne) przedstawiono w pracach [4, 9, 12, 42, 44, 46, 68].

Wśród parametrów geometrycznych połączenia i łączonych elementów należy wymienić [24, 30]:

- rozmiary łączonych elementów oraz ich kształt,
- rozmiar powierzchni spoiny klejowej,
- lokalizacja połączenia i spoiny klejowej w konstrukcji.

Czynniki te determinują wybór oprzyrządowania do nakładania klejów, wybór sposobu nakładania kleju, rozwiązania konstrukcyjne urządzeń do ustalania łączonych elementów, wywierania ciśnienia podczas utwardzania i inne.

3.2.2. Rodzaj produkcji

Rodzaj produkcji stanowi jedno z istotnych kryteriów doboru oprzyrządowania technologicznego w procesie klejenia. W produkcji jednostkowej stosowane są różnorodne przyrządy i urządzenia o prostej budowie, często wykorzystywane także do innych prac. W przypadku produkcji seryjnej stosowane są urządzenia automatyczne lub półautomatyczne, umożliwiające ciągłą pracę w linii produkcyjnej lub montażowej oraz współpracę z innymi stanowiskami roboczymi.

Przykładowo w produkcji seryjnej stosuje się dozowniki klejów o różnej konstrukcji i sposobie działania, automatyczne lub półautomatyczne, które znacznie skracają czas operacji, umożliwiają precyzyjne i powtarzalne dozowanie (oraz nakładanie) klejów. Nie mniej ważny jest aspekt ekonomiczny zastosowania automatycznych dozowników kleju, gdyż pomimo kosztów poniesionych na zakup tego urządzenia, precyzyjne dozowanie klejów pozwala na uniknięcie strat materiałowych kleju nakładanych metodą ręczną. W przypadku produkcji seryjnej może przynieść to znaczące oszczędności często drogich klejów specjalistycznych.

3.2.3. Rodzaj i właściwości kleju

Rodzaj i właściwości kleju determinują przede wszystkim rozwiązania konstrukcyjne oprzyrządowania do dozowania składników kleju, ich mieszania oraz dozowania i nakładania kleju. Istotna jest ilość składników kleju, ich właściwości, postać oraz kolejność dodawania, ponieważ czynniki te wpływają nie tylko na rozwiązania konstrukcyjne urządzeń, ale także na opracowanie operacji przygotowania kleju.

Wybór metody mieszania oraz rodzaj zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego mieszadła jest zależny m.in. od lepkości kleju. Postać kleju (ciecz, ciało

stałe) przyczynia się do wyboru urządzeń do dozowania oraz nakładania kleju na łączone powierzchnie. Niekiedy w przypadku klejów w postaci brył konieczne jest ich rozdrobnienie. Kleje w formie granulek, prętów wymagają zastosowania specjalnych urządzeń do podgrzewania, a także w niektórych przypadkach występuje rozwiązanie technologiczne podgrzewania powierzchni łączonych elementów. W przypadku kleju w postaci błon, folii, mat jest konieczne wycięcie z nich odpowiedniego kształtu dostosowanego do wymiarów łączonych materiałów z wykorzystaniem stosownych narzędzi.

3.2.4. Sposób montażu połączeń klejowych

Wśród wymagań dotyczących wyboru rodzaju i konstrukcji połączeń klejowych, podczas wykonywania tego typu połączeń w montażu automatycznym lub półautomatycznym należy uwzględnić m.in. [1, 6, 13, 46]:

- kierunek i złożoność ruchów koniecznych do wykonania połączenia,
- rodzaj kontaktu w połączeniu (punktowy, liniowy, przestrzenny, powierzchniowy),
- kształt łączonych powierzchni – w przypadku połączeń klejowych najlepsze wyniki uzyskuje się w łączeniu powierzchni walcowych, ponieważ w takich połączeniach w warstwie kleju występują naprężenia ścinające pod obciążeniem zarówno siłą osiową, jak i momentem skrętnym; w odniesieniu do elementów cienkościennych, najczęściej wykonuje się różnego typu połączenia zakładkowe płaskich powierzchni;
- dokładność wykonania łączonych powierzchni, przewidywane luzy;
- liczbę, kształty i cechy elementów tworzących połączenie;
- liczbę jednakowych połączeń w wyrobie i ich wzajemne usytuowanie;
- dostęp narzędzia do strefy połączenia oraz jego wymagane cechy wytrzymałościowe i niezawodnościowe;
- czas konieczny i dysponowany na wykonanie połączenia.

Proces montażu uzależniony jest także od sposobu montażu, czy jest on realizowany w sposób ręczny, czy automatyczny.

Sposób wykonywania połączeń klejowych uwzględnia czynniki wpływające na poprawność wykonania połączeń klejowych [24, 25], dlatego jest konieczne ich uwzględnienie podczas opracowywania procesu montażu określonego rodzaju połączenia.

3.3. Wskazówki do projektowania przyrządów klejarskich

Przyrządy klejarskie klasyfikowane są najczęściej, jako przyrządy specjalne lub specjalizowane, gdyż najczęściej przyrząd jest projektowany do konkretnej operacji technologicznej klejenia w odniesieniu do określonego rodzaju połączenia klejowego. Można jednak wymienić ogólne wytyczne, które przyczyniają się do właściwego zaprojektowania przyrządów klejarskich. Wśród tych zaleceń, wyróżnia się następujące [12, 17, 23, 42]:

- docisk stosowany w procesie utwardzania powinien być wywierany na całą powierzchnię sklejenia w celu uzyskania spoiny klejowej o jednakowej grubości, z tego względu nie zaleca się stosowania docisków punktowych,
- konstrukcja przyrządu nie powinna powodować odkształceń łączonych elementów, w tym przypadku konieczna jest analiza kształtu, rozmiarów i masy poszczególnych elementów wykonawczych przyrządu, stykających się bezpośrednio z powierzchniami klejonych elementów,
- przyrząd powinien umożliwiać swobodne odkształcanie łączonych elementów,
- w przypadku elementów grzejnych, powinny być one tak konstruowane, aby zapewnić równomierną temperaturę w całej strefie klejenia,
- kształt elementów ustalających powinien odpowiadać kształtom łączonych powierzchni,
- elementy szybciej zużywające się powinny być wykonane z materiałów bardziej odpornych na zużycie lub obrobione cieplnie,
- ostre krawędzie powinny być zaokrąglone lub stępione,
- należy dążyć, aby przyrząd powinien mieć minimalną masę, ale przy dostatecznie sztywnej budowie,
- jeżeli jest to możliwe należy stosować elementy znormalizowane, wpływa to na zmniejszenie kosztu wykonania przyrządu,
- powierzchnie kontaktu przyrządów (m.in. elementów ustalających oraz mocujących) powinny charakteryzować się odpowiednią chropowatością powierzchni, ponieważ nie powinny uszkadzać powierzchni łączonych,
- konieczność uwzględnienia możliwości czyszczenia lub wymiany niektórych elementów oprzyrządowania po zakończeniu operacji m.in. nakładania kleju (np. czyszczenie lub wymiana pojemników zawierających określone składniki klejów lub klej),
- należy uwzględnić także rodzaj produkcji oraz sposób montażu, ponieważ w przypadku produkcji seryjnej w przypadku montażu automatycznego lub półautomatycznego należy uwzględnić fakt współpracy z innymi przyrządami lub stanowiskami,
- w przypadku produkcji elastycznej z zastosowaniem elastycznego procesu montażu, konieczność uwzględnienia możliwości szybkiego przebrojenia określonych elementów oprzyrządowania klejarskiego.

Nie mniej ważnym aspektem jest także rodzaj klejonego materiału, ze względu na możliwość wystąpienia silnego zjawiska adhezji pomiędzy powierzchnią łączonego materiału a powierzchnią elementów wykonawczych oprzyrządowania. Wówczas podczas konstruowania oprzyrządowania należy zapewnić albo inny rodzaj materiału elementów wykonawczych, albo zastosować dodatkowy element wykonany z innego materiału (np. wymienną podkładkę). Jest możliwe także wprowadzenie do technologii wykonywania połączeń klejowych dodatkowych operacji związanych z zabezpieczaniem stykających się powierzchni za pomocą środków antyadhezyjnych.

Przedstawione wskazówki mogą być pomocne podczas projektowania konstrukcji przyrządów klejarskich, a poprawność wykonania oprzyrządowania w istotny sposób wpływa na prawidłowość wykonania połączeń klejowych, przyczyniając się do ograniczenia strat finansowych wynikających ze zmniejszenia ilości wadliwie wykonanych połączeń.

3.4. Przygotowanie powierzchni elementów oprzyrządowania

Podczas stosowania oprzyrządowania w operacjach klejenia ważnym aspektem jest odpowiednie przygotowanie powierzchni przyrządów, które stykają się z klejem oraz z łączonymi elementami [24]. Jedną z takich operacji jest przygotowanie oraz nakładanie kleju. Podczas przygotowania kleju często stosuje się wymienne (jednorazowe) elementy przyrządów, np. mieszadła oraz pojemniki. Pozostałe elementy przyrządów mogą być wykonane z materiałów charakteryzujących się małą adhezją do kompozycji klejowej (kleju) lub też powierzchnie elementów pokryte są środkami antyadhezyjnymi lub smarami. Stosuje się także różnego rodzaju środki chemiczne służące oczyszczeniu powierzchni elementów z pozostałości kleju. Nakładanie kleju najczęściej także przeprowadza się wykorzystując elementy jednorazowego wykorzystania.

Kolejną operacją, w której należy zwrócić uwagę na odpowiednie przygotowanie powierzchni elementów oprzyrządowania, jest utwardzanie spoiny klejowej. W czasie utwardzania spoiny klejowej może nastąpić wypłynięcie kleju poza strefę spoiny klejowej, które może spowodować sklejenie łączonych elementów z powierzchniami oprzyrządowania, a także z innymi łączonymi elementami oraz może wpłynąć na estetykę wykonania połączenia. W takim przypadku najczęściej stosuje się różnego rodzaju środki antyadhezyjne (w tym smary antyadhezyjne) lub folie antyadhezyjne (rys. 3.2).

a)



b)



c)



Rys. 3.2. Przykład: a) środka antyadhezyjnego [131], b) folii antyadhezyjnej [130], c) taśmy antyadhezyjnej teflonowej [75]

Źródło: Opracowanie własne

Folie antyadhezyjne są najczęściej wykonywane z takich tworzyw polimerowych jak: polietylen, polipropylen oraz politetrafluoroetylen (teflon). Przykładowo folie z polietylenu zabezpieczają sklejanie łączonych elementów z powierzchniami elementów przyrządów ustalających podczas utwardzania spoiny klejowej w temperaturze poniżej 80°C. Folię polipropylenową można stosować podczas utwardzania spoiny klejowej w temperaturze poniżej 130–150°C, natomiast w wyższej temperaturze do 200°C – folię z teflonu.

Istnieje wiele różnorodnych środków antyadhezyjnych, różniących się zarówno możliwością aplikacji, jak również bazą chemiczną oraz przeznaczeniem i warunkami stosowania. Przegląd przykładowych środków antyadhezyjnych zamieszczono w tabeli 3.1 [77, 82, 83, 127, 131].

Tabela 3.1. Wybrane środki antyadhezyjne i ich charakterystyka

Rodzaj środka	Krótką charakterystyka
EXTILUB	Jest to smar suchy na bazie PTFE (teflon). Tworzy na podłożu suchą, trwałą powłokę poślizgową.
TECHFORM Sil	Jest to silikonowy środek antyadhezyjny. Może być wykorzystany w temperaturze do 200°C. Po rozpyleniu tworzy równomierną hydrofobową, antyprzyczepną i dielektryczną warstwę, stabilną w szerokim zakresie temperatury. Może być wykorzystany do powlekania powierzchni części oprzyrządowania wykonanych zarówno z metali, jak i tworzyw polimerowych, także do smarowania i konserwacji powierzchni roboczych elementów grzejnych.
EXPERT LINE®	Expert Line jest antyadhezyjnym silikonowym środkiem antyadhezyjnym na bazie olejów silikonowych oraz rozpuszczalników organicznych. Produkt posiada własności ochronne i zabezpieczające, przy czym nie pozostawia osadów. Produkt jest bezbarwny, bezwonny, nieszkodliwy, stosowany w postaci aerozolu.
PULSAR PAS	Jest to silikonowy środek antyadhezyjny, niepozostawiający osadów. Preparat wypiera wodę i zabezpiecza trwale powierzchnie przed wilgocią i korozją. PAS jest izolatorem oraz dobrze odprowadza ciepło. Posiada wysoką odporność fizyko-chemiczną. Jako preparat smarny rozdziela, konserwuje i smaruje współpracujące powierzchnie. Jest stosowany do zabezpieczania elementów także w niskiej temperaturze. Zakres temp. pracy: - 40°C do +250°C.
AMBERSIL FORMULA 6	Środek ten jest produkowany na bazie silikonów rozdrobnionych w mieszaninie rozpuszczalników. Może być również stosowany, jako środek poślizgowy lub antyprzyczepny. Nie odkłada się i nie tworzy narostów na elemencie, zapewnia dobrą jakość powierzchni, redukuje ilość braków. Temperatura pracy wynosi do 200°C. Jest wydajny i łatwy do stosowania w postaci aerozolu, a także opakowanie może być wyposażone w zawór 360° umożliwiający aplikację do góry dnem.

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu.

Nakładanie środków adhezyjnych może odbywać się ręcznie za pomocą pędzla lub metodą natryskową z wykorzystaniem odpowiednio ukształtowanych dysz. Często środki antyadhezyjne znajdują się w pojemnikach w postaci aerozolu z aplikatorem (spryskiwaczem), który umożliwia naniesienie środka bezpośrednio na powierzchnię oprzyrządowania.

Należy zwrócić uwagę również na możliwość reakcji chemicznej środka antyadhezyjnego z kompozycją klejową (jej składnikami) oraz z powierzchniami oprzyrządowania.

Wśród kryteriów stosowanych przy wyborze środka antyadhezyjnego do określonego zastosowania można wymienić:

- możliwość aplikacji,
- wymiary gabarytowe elementów oprzyrządowania,
- właściwości,
- możliwość oddziaływania chemicznego z materiałem elementów oprzyrządowania,
- czas aplikacji,
- wielkość opakowania,
- cena,
- możliwość zastosowania środka w liniach automatycznych,
- inne.

Oprócz stosowania środków i folii antyadhezyjnych przygotowanie powierzchni oprzyrządowanie w operacji składania i ustalania oraz w procesie utwardzania elementów może polegać na zabezpieczeniu elementów bezpośrednio stykających się z powierzchnią klejonego i wywierających nacisk na wyposażeniu tych elementów w elementy w postaci miękkich materiałów (np. filce, tkaniny, gumy silikonowe, pianki silikonowe [75]). Ma to na celu ochronę powierzchni łączonych elementów przed różnymi uszkodzeniami, np. zarysowaniu powierzchni, wgnieceniu itp.

4. Przygotowanie powierzchni łączonych elementów

4.1. Odtłuszczenie (oczyszczanie chemiczne)

Operacja odtłuszczenia (oczyszczania chemicznego) może być wykonywana z wykorzystaniem różnorodnych metod, przy zastosowaniu odpowiednich urządzeń i środków chemicznych [12, 17]. Do tego celu mogą być stosowane następujące urządzenia [24, 81, 99, 86]:

- myjki komorowe za pomocą par trichloroetylenu lub tetrachloroetylenu (metoda ciągła – pary odczynników skraplają się na odtłuszczanych powierzchniach, zmywając je w sposób ciągły),
- myjki wannowe elektrolityczne lub ultradźwiękowe (rys. 4.1) z wykorzystaniem płynnych rozpuszczalników (np. benzyny, acetonu, benzeno, etanolu),
- myjki natryskowe.

a)



b)



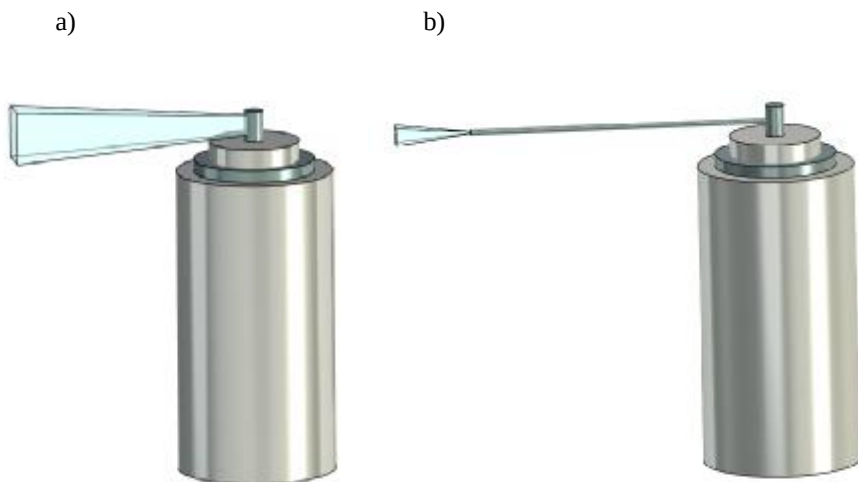
Rys. 4.1. Przykład: a) myjki wannowej ultradźwiękowej PS-80A [81], b) linii ultradźwiękowej [86]

Technologia oczyszczania za pomocą ultradźwięków zapewnia szybkie i bardzo skuteczne oczyszczanie powierzchni. Oczyszczanie ultradźwiękowe odbywa się przez zanurzenie przedmiotów przez określony czas w odpowiednio dobranych cieczach i poddanie ich działaniu ultradźwięków o odpowiednim natężeniu do procesu technologicznego [99, 101]. Źródłem drgań ultradźwiękowych są przetworniki typu sandwich przyklejone do dna lub ścian zbiornika wanny, zasilane z generatorów ultradźwiękowych. Energia wytwarzana przez przetworniki ultradźwiękowe w płynie myjącym dociera do najbardziej niedo-

stępnych miejsc. Zjawisko kawitacji powoduje, że drgania przenikają przez materiał w związku z czym brud jest usuwany z całej powierzchni. Ultradźwięki w roztworze oczyszczającym wytwarzają fale ciśnienia w postaci implodujących pęcherzyków, które odrywają zanieczyszczenia z powierzchni oczyszczanych elementów. W myjkach ultradźwiękowych wykorzystuje się wodne roztwory środków myjących lub płyny organiczne.

Oczyszczanie chemiczne wykonywane jest także za pomocą tkanin nasyconych rozpuszczalnikami, metodą spryskiwania odpowiednimi środkami odtłuszczającymi, jak również poprzez zanurzenie w rozpuszczalniku (moczenie wstępne), a następnie umycie za pomocą narzędzi i urządzeń mechanicznych. Ostatni sposób odnosi się zwłaszcza do elementów pokrytych smarami, a często traktowany jest, jako czynność wstępna [17].

W przypadku zastosowania metody spryskiwania odpowiednimi środkami odtłuszczającymi, stosowane są różnego rodzaju dozowniki ze spryskiwaczami lub różnorodnymi aplikatorami (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Przykłady: a) dozownika ze spryskiwaczem b) aplikatora stosowanego w trudno dostępnych miejscach

Źródło: Opracowanie własne

Stosowanie różnych końcówek dostosowanych do pojemników ze środkami odtłuszczającymi umożliwia dostęp i oczyszczenie miejsc trudnodostępnych.

4.2. Oczyszczanie w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej

Na powierzchniach metali najczęściej znajdują się warstwy tlenków lub zgorzelin, które osłabiają połączenia klejowe. Mogą też utrudniać właściwe przygotowanie powierzchni podczas innych rodzajów obróbek przygotowawczych. Celem operacji oczyszczania powierzchni w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej jest usunięcie tych właśnie tlenków. Istnieją zalecenia dotyczące stosowania poszczególnych kąpeli oczyszczających dla określonych materiałów. Jednak rzadko są ujawniane przez producentów składy chemiczne kwaśnych i alkalicznych roztworów czyszczących. Przykładowo dla stali i stopów tytanu zaleca się stosowanie kąpeli kwaśnych, dla stopów aluminium natomiast kąpeli alkalicznych [12, 17]. Do tej operacji wykorzystywane są różnorodne myjki wannowe, myjki komorowe, a najczęściej stosowane metody to: zanurzeniowa i natryskowa.

4.3. Płukanie

Operacja płukania występuje najczęściej po oczyszczaniu powierzchni w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej, także po obróbce specjalnej powierzchni. Celem tej operacji jest usunięcie z powierzchni przeznaczonej do klejenia pozostałości środków chemicznych lub innych po operacji oczyszczania oraz obróbce specjalnej.

Płukanie można przeprowadzić z użyciem wody (np. po trawieniu chemicznym) lub z wykorzystaniem rozpuszczalników stosowanych do odtłuszczania (po specjalnej obróbce mechanicznej). Można do tego celu wykorzystać wodę zimną lub gorącą, wodociągową, odmineralizowaną lub destylowaną. Płukanie można przeprowadzić metodą zanurzeniową lub natryskową. Zestawienie wskaźników, które należy uwzględnić podczas opracowywania operacji płukania, zestawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Przykładowe wskaźniki charakteryzujące operację płukania

Wskaźnik	Rodzaj metody/zastosowanego środka
Rodzaj środka	§ woda
	§ rozpuszczalniki stosowane do odtłuszczania
Rodzaj wody	§ zimna, gorąca
	§ wodociągowa, demineralizowana, destylowana
Metoda	§ zanurzeniowa
	§ natryskowa

Źródło: opracowanie własne

W literaturze przedstawione są często sprzeczne informacje dotyczące parametrów technologicznych operacji płukania (rodzaj wody, temperatura wody, czas płukania) dla poszczególnych rodzajów materiałów [16, 30].

Wśród urządzeń wykorzystywanych do operacji płukania wymienia się:

- myjki komorowe (rys. 4.3),
- myjki natryskowe,
- płuczki.

Często urządzenia te łączą ze sobą funkcje płukania (także mycia) oraz suszenia. Operacje te mogą odbywać się w obiegach zamkniętych, co w istotny sposób wpływa na obniżenie kosztów eksploatacyjnych urządzeń.



Rys. 4.3. Myjka komorowa [87]

Jednym z przykładowych myjek komorowych jest myjka KMN 100 (rys. 4.3). Jest to urządzenie myjące środkami na bazie wody, przeznaczone do usuwania zanieczyszczeń po obróbce chemicznej lub elektrochemicznej, zanieczyszczeń olejowych, emulsji obróbkowych i luźnych wiórów po obróbce mechanicznej z powierzchni przedmiotów. Myjka ta może także współpracować z jednym lub kilkoma gniazdami obróbkowymi w linii montażowej lub produkcyjnej.

Detale umieszczane są w koszach, bądź na specjalnie zaprojektowanych paletach ładunkowych, które zapewniają im bezpieczeństwo w trakcie procesu właściwego płukania, jak również transportu. Proces płukania jest realizowany w ruchomym obrotniku znajdującym się wewnątrz komory roboczej urządzenia poprzez natrysk lub zanurzenie. Odbywający się wokół poziomej osi myjki obrót kosza zapewnia detalom dokładne mycie, a także i suszenie (np. gorącym powietrzem albo w próżni).

Innym przykładem urządzeń, wykorzystywanych w procesie płukania są myjki natryskowe (rys. 4.4) oraz płuczki (rys. 4.5).



Rys. 4.4. Myjka natryskowa IS-500N [99]

Myjka natryskowa (rys. 4.4) może być przeznaczona do płukania metodą natryskową różnorodnych elementów. Na wyposażenie urządzenia składa się kosz obrotowy napędzany mechanicznie, układ filtracji i separacji, dysze natryskowe z regulacją kąta wychylenia oraz układ podgrzewania środka myjącego.



Rys. 4.5. Płuczka IS-125OS [99]

Płuczka (rys. 4.5) z oscylacją kosza wykorzystywana jest do mycia różnych elementów, których płukanie rozpoczyna się automatycznie od momentu założenia kosza na ramiona poruszające się za pomocą mechanizmu opuszczająco-podnoszącego.

4.4. Suszenie

Operacja suszenia najczęściej wykonywana jest po operacji płukania. Ma na celu usunięcie wody z przygotowywanej powierzchni, na którą nanoszony jest klej lub przeznaczona do dalszej obróbki przygotowawczej.

Suszenie może być realizowane w otaczającym powietrzu, w strumieniu powietrza (które może być również ogrzane do temperatury 40–50°C), w atmosferze gazu obojętnego (np. azotu, argonu, rys. 4.6), w suszarce komorowej (rys. 4.7).



Rys. 4.6. Suszarka umożliwiająca suszenie w atmosferze gazu obojętnego [80]



Rys. 4.7. Suszarka przemysłowa komorowa [103]

Dobór sposobu suszenia zależy przede wszystkim od rodzaju materiału przeznaczonego do suszenia. Przykładowo, przy powolnym suszeniu powierzchni stopów żelaza, w atmosferze czystego powietrza, następuje proces korozji tych powierzchni. Wynikiem tego jest zmniejszenie wytrzymałości takiego połączenia klejowego. Korozja może zostać wyeliminowana, jeżeli suszenie będzie odbywało się w atmosferze gazu obojętnego [17].

4.5. Obróbka powierzchni

4.5.1. Metody mechaniczne

Wśród metod mechanicznych można wymienić m.in.: obróbkę ściernymi narzędziami nasypowymi, obróbkę strumieniowo-ścierną (rys. 4.8), piaskowanie (rys. 4.9), śrutowanie, kulowanie, szczotkowanie, skrobanie, szlifowanie [12, 17, 24, 42].



Rys. 4.8. Ciśnieniowa komorowa oczyszczarka strumieniowa [84]

Przedstawiona na rys. 4.9 ciśnieniowa komorowa oczyszczarka strumieniowa umożliwia przeprowadzenie obróbki strumieniowo-ściernej z zastosowaniem dowolnego materiału ściernego.



Rys. 4.9. Przykład piaskarki [94]

Obróbka mechaniczna umożliwia ukonstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni (zapewniającej maksymalne jej rozwinięcie), jednak nie gwarantuje dobrego uaktywnienia powierzchni. Zauważono, że najlepsze właściwości wytrzymałościowe uzyskują połączenia, w których powierzchnia elementów ma chropowatość (zdefiniowaną maksymalną wysokością chropowatości) $R_{\max} = 7\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ [17]. Stwierdzono także, że obróbka mechaniczna może ukonstytuować w warstwie wierzchniej łączonych elementów nadmierne naprężenia ściskające, które wywołują odkształcenia sklejanых części. Jest to przyczyną wprowadzenia do spoiny dodatkowych naprężeń, które mogą spowodować zmniejszenie wytrzymałości połączeń klejowych nawet o 10–50% [24].

4.5.2. Metody chemiczne i elektrochemiczne

Metody chemiczne pozwalają na odpowiednie rozwinięcie powierzchni i warstwy powierzchniowej o składzie chemicznym zapewniającym dużą aktywność fizykochemiczną powierzchni w odniesieniu do stosowanego kleju. Skutecznie także chronią metal przed korozją. Obróbka chemiczna najczęściej polega na trawieniu powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia w kąpielach o odpowiednim składzie i określonej temperaturze. Ważny jest także czas trawienia. Zalecenia odnośnie trawienia różnych materiałów przedstawiono w literaturze dotyczącej zagadnień technologii klejenia.



Rys. 4.10. Przykład wanny do trawienia, wykonanej z tworzywa polimerowego [122]

W przypadku trawienia wykazano, że skład kąpeli trawiącej w istotny sposób wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych. Przykładowo, wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych stopów aluminium trawionych w 4% NaOH jest o 40% większa od trawionych w 20% HNO₃ [24].

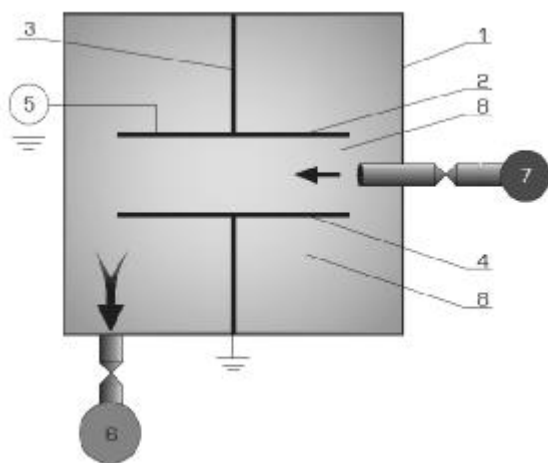
Trawienie można przeprowadzić w różnorodnych urządzeniach, najczęściej w postaci wanien do trawienia (rys. 4.10), które mogą stanowić samodzielne urządzenie lub pracować w liniach technologicznych. Wanny mogą być wykonane ze stali, stali stopowej o podwyższonej odporności na korozję oraz z tworzyw polimerowych. Często w wanny stalowe wyłożone są wkładem z tworzyw polimerowych.

Jedną z częściej stosowanych obróbek elektrochemicznych przed procesem klejenia jest anodowanie [5, 12, 48]. Jest to rozpowszechniona obróbka powierzchniową metali, która polega na elektrolitycznym wytworzeniu warstwy tlenku. Anodowanie stosuje się głównie w stosunku do aluminium i jego stopów, ale może być także stosowane do niektórych odmian stali, tytanu i stopów magnezu.

Warstwy tlenkowe otrzymywane z roztworów o średniej zdolności rozpuszczania cechują się specyficzną strukturą porowatą. Regularnie rozmieszczone pory przechodzące prawie przez całą grubość powłoki tlenkowej prostopadle do podłoża posiadają średnicę od kilkunastu do kilkudziesięciu nanometrów zależnie od warunków procesu anodowego utleniania. Od strony podłoża znajduje się cienka warstwa nieporowata, tzw. warstwa barierowa. Dzięki gęsto rozmieszczonym porom o małej średnicy powierzchnia tak uzyskanego tlenku glinu jest silnie rozwinięta i posiada dobre zdolności adsorpcyjne, co wykorzystywane jest m.in. w procesach barwienia, klejenia [3, 5].

4.5.3. Metoda plazmowa

Metoda plazmowa znajduje zastosowanie głównie podczas przygotowywania warstwy wierzchniej tworzyw polimerowych. W metodzie tej następuje modyfikacja warstwy wierzchniej tworzywa polimerowego pod wpływem działania plazmy niskotemperaturowej, która powstaje w wyniku wyładowań niezupełnych, zachodzących w komorze próżniowej. Natomiast wyładowania te powstają na skutek działania szybkozmiennego pola elektromagnetycznego w ośrodku gazowym. Plazma może być generowana w atmosferze tlenu, powietrza, azotu, argonu, helu, fluoru, ksenonu lub chloru [22, 71, 72].



Rys. 4.11. Schemat układu z elektrodami znajdującymi się w komorze wyładowczej: 1 – obudowa komory wyładowczej, 2 – elektroda wyładowcza, 3 – wspornik izolacyjny elektrody wyładowczej, 4 – elektroda uziemiona, 5 – generator wysokiego napięcia, 6 – pompy próżniowe, 7 – źródło gazu, 8 – obszar powstawania plazmy [22]

Podczas stosowania metody plazmowej wykorzystuje się specjalne urządzenie, którego podstawowym elementem jest komora wyładowcza (komora próżniowa), w której następuje właściwy proces modyfikowania plazmowego. Przykładowy schemat takiego urządzenia zamieszczono na rys. 4.11.

4.5.4. Metoda wyładowań koronowych

Metoda wyładowań koronowych (koronowanie) jest odmianą metody wyładowań niezupełnych. Podczas tej metody wyładowania koronowe zachodzą w urządzeniach służących do aktywowania, posiadających przestrzeń wypełnioną powietrzem znajdującym się pod ciśnieniem atmosferycznym [72] W urządzeniu do koronowania, zwanym skototronem [52], aktywowana po-

wierzchnia przemieszcza się w pobliżu elektrod pod wysokim napięciem. Między elektrodami powstaje wyładowanie koronowe i tworzy się plazma, czyli mieszanina gazu z aktywnymi cząsteczkami: jonami, elektronami.

Przykładowe urządzenia do koronowania zamieszczono na rys. 4.12-4.14. Przedstawione urządzenia do koronowania składają się z jednostki roboczej oraz generatora.



Rys. 4.12. Urządzenie do koronowania (skototron) AFS do folii [132]



Rys. 4.13. Urządzenie do koronowania GUN-CKG rur i profili [132]

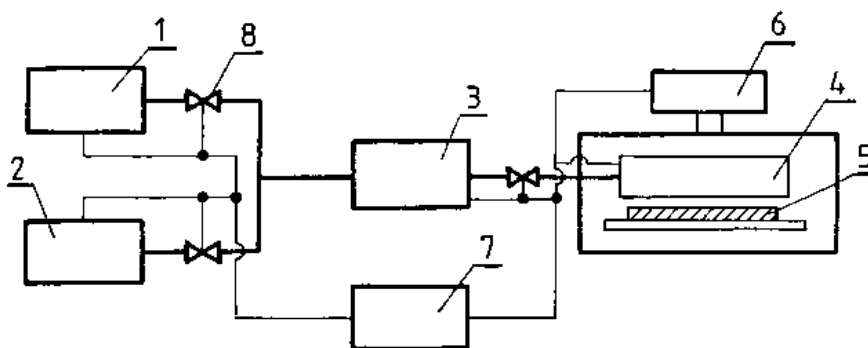


Rys. 4.14. Urządzenie do koronowania TIGRES: Plazma MEF [121]

Koronowanie jest efektywną metodą zwiększenia napięcia powierzchniowego folii z tworzyw polimerowych i substratów metalizujących, ale także niechłonnych powierzchni papieru i kartonu [121].

4.5.5. Metoda płomieniowa

W metodzie płomieniowej modyfikowany materiał (głównie tworzywo polimerowe) poddawane jest oddziaływaniu przez krótki czas (od ułamka sekundy do kilku sekund) płomienia gazowego, powstałego w wyniku spalania gazu w powietrzu.



Rys. 4.15. Schemat urządzenia do płomieniowego modyfikowania warstwy wierzchniej tworzyw polimerowych: 1 – źródło gazu, 2 – źródło powietrza, 3 – komora mieszania powietrza i gazu, 4 – palnik, 5 – modyfikowane tworzywo, 6 – wentylator wyciągowy, 7 – komputer i układ sterujący, 8 – zawory [71]

Do tego celu wykorzystuje się specjalne urządzenia oraz stosuje się, jako gaz najczęściej mieszaninę lekkich węglowodorów nasyconych z dominującym

udziałem metanu lub propanu. Schemat przykładowego urządzenia stosowanego w metodzie płomieniowej zamieszczono na rys. 4.15.

4.5.6. Inne metody - obróbka powierzchni materiałów polimerowych z wykorzystaniem różnych rodzajów promieniowania

Wśród metod polegających na oddziaływaniu promieniowania elektromagnetycznego na powierzchnie materiałów, wymienia się następujące metody obróbki powierzchni [22, 30, 72]:

- promieniowaniem nadfioletowym UV,
- promieniowaniem laserowym,
- promieniowaniem jonizacyjnym,
- promieniowaniem elektronowym,
- promieniowaniem γ .

Wymienione metody stosowane są przede wszystkim do obróbki tworzyw polimerowych.

Obróbka powierzchni promieniowaniem nadfioletowym UV o długości fali $\lambda = 150\text{--}250\text{ nm}$ w atmosferze tlenu lub ozonu, powoduje utlenianie powierzchni, zmniejszenie kąta zwilżania i znaczne zwiększenie wytrzymałości adhezyjnej [72]. Promieniowanie UV może być emitowane przez lampy wyładowcze, wyładowania mikrofalowe w specjalnych generatorach, a także źródłem tego promieniowania mogą być lasery [22, 30, 72].

Metody wykorzystujące promieniowanie laserowe do obróbki powierzchni materiałów polimerowych [72] wykorzystują generowanie efektów cieplnych, co powoduje stapianie mikroobszarów powierzchni o grubości kilku mikrometrów, zwiększenie chropowatości powierzchni, oraz usuwanie jej fragmentów, a jeżeli proces przebiega w obecności tlenu następuje także utlenianie na powierzchni [22]. Promieniowanie laserowe jest wykorzystywane do bardzo dokładnej obróbki małych powierzchni o złożonej geometrii. Promieniowanie laserowe wpływa na poprawę zwilżalności i wartości swobodnej energii powierzchniowej przez implementację polarnych grup funkcyjnych, głównie w procesie utleniania, stopień usieciowania polimeru oraz rodzaj struktury geometrycznej powierzchni, bez zmiany własności rdzenia [22].

Promieniowanie jonizacyjne jest wykorzystywane m.in. do kształtowania właściwości powierzchni polimerów [72]. Źródłem promieniowania jonizacyjnego mogą być o różnej konstrukcji akceleratory, w tym niskoenergetyczne o energii elektronów niższej od 100 keV [22].

Obróbka powierzchniowa promieniowaniem elektronowym [22, 72] wykorzystuje źródła promieniowania elektronowego, którymi są akceleratory elektronów, a także izotopowe źródła promieniowania gamma, jako źródła promieniowania jonizującego. Podstawowymi parametrami akceleratorów jest moc i energia kinetyczna elektronów, od których zależy zwiększenie głębokości wnikania elektronów w obrabiany materiał oraz wydajność procesu. Podczas na-

promieniania materiału polimerowego w powietrzu zachodzi utlenianie jego warstwy wierzchniej, co wpływa na zwiększenie zwilżalności i wzrost swobodnej energii powierzchniowej, także na granicy faz obrabianego materiału, a tym samym na poprawę własności adhezyjnych obrabianego materiału.

Promieniowanie elektronowe można przeprowadzać również w atmosferze reaktywnych gazów, m.in. takich jak O_2 lub NH_3 , w celu wytworzenia polarnych grup funkcyjnych w warstwie wierzchniej modyfikowanego materiału [22].

Obróbka powierzchniowa promieniowaniem gamma γ (o długości fali około 0,01 nm) jest realizowana najczęściej w atmosferze powietrza [72], przy czym obróbka materiału następuje na dużo większych głębokościach niż podczas m.in. działania promieniowania UV. Źródłem promieniowania są wzbudzone jądra wybranych pierwiastków, głównie kobaltu lub w mniejszym stopniu cezu. Podczas ekspozycji materiału polimerowego następuje utlenianie, degradacja oraz sieciowanie [22].

4.6. Nakładanie gruntów

Nakładanie specjalnych primerów (środków proadhezyjnych, aktywatorów) zalecane jest dla niektórych materiałów (zwłaszcza trudnosklejanych), jako ostatnia czynność operacji przygotowania powierzchni łączonych materiałów, przed nałożeniem klejów [24, 40, 64, 65, 69]. Środki te zawierają chemicznie czynne grupy funkcyjne reagujące zarówno z klejonymi powierzchniami, jak i z klejem. Operacja ta istotnie wpływa na zwiększenie wytrzymałości adhezyjnej połączenia klejowego lub też na przyspieszenie procesu sieciowania. W przypadku przyspieszenia procesu sieciowania, aktywator наносzony jest tylko na powierzchnię jednego z łączonych elementów. Aby zwiększyć wytrzymałość połączenia klejowego aktywator należy nakładać na obie łączone powierzchnie.

Primery (rys. 4.16) najczęściej dobiera się w taki sposób, aby mogły jednocześnie chemisorbować się na powierzchni klejonego materiału i wiązać chemicznie z klejem. Wśród stosowanych primerów należy wymienić m.in. silany (najbardziej znane, zwłaszcza do klejenia szkła i metali), tytania i cyrkoniany metali. Jako primery stosuje się także żywice fenolowo-formaldehydowe, chlorowane kauczuki (do klejenia polipropylenu), związki heterocykliczne zawierające azot (do klejenia miedzi), związki poliuretanowe, akrylowe, nitrocelulozowe i żywice naturalne [24, 35, 64].



Rys. 4.16. Przykładowe primery [104]

Przed przystąpieniem do operacji nakładania gruntów należy dobrać primer odpowiedni dla określonego układu materiał klejony-klej oraz niektóre parametry technologiczne klejenia, zwłaszcza czas, jaki upłynie od naniesienia primera do naniesienia kleju na łączone powierzchnie oraz postać, w jakiej stosowany jest środek proadhezyjny.



Rys. 4.17. Przykład primera firmy Loctite z pędzlem do jego nakładania [106]

Nakładanie primerów może odbywać się w sposób ręczny za pomocą pędzli (najczęściej pędzle znajdują się w opakowaniu primera – rys. 4.17), metodą spryskiwania (primery w postaci aerozolu z różnymi spryskiwaczami) lub w sposób zautomatyzowany z użyciem specjalnych dozowników.

5. Przygotowanie i nakładanie klejów

5.1. Charakterystyka procesu przygotowania i nakładania klejów

Sposób przygotowania kleju zależy głównie od jego postaci handlowej. Ze względu na stan skupienia wyróżnia się kleje stałe, półpłynne oraz ciekłe. Kleje stałe występują najczęściej w postaci jednoskładnikowej i są gotowe do bezpośredniego użycia [10, 16, 24]. Natomiast niektóre kleje występujące w handlu w postaci stałej lub ciekłej wymagają, aby przed użyciem dodać do nich niezbędne substancje pomocnicze, takie jak np. rozpuszczalniki, napelniacze, utwardzacze oraz inne składniki dodatkowe.

Przygotowanie klejów dotyczy głównie klejów wieloskładnikowych (najczęściej kleje w postaci ciekłej lub półpłynnej) złożone są one z wielu składników, m.in.: z żywicy (substancji klejącej), utwardzacza, aktywatora lub katalizatora procesu sieciowania, substancji modyfikujących i innych substancji [10, 12, 18, 63].

Składniki kompozycji klejowej powinny być połączone w odpowiedniej proporcji. Zarówno nadmiar, jak i niedobór utwardzacza może prowadzić do niewłaściwego usieciowania polimeru. Taki przypadek skutkuje wytworzeniem spoiny klejowej o małej wytrzymałości [18].

Podczas sporządzania masy klejowej oprócz żywicy i utwardzacza dodaje się także w wielu przypadkach substancje modyfikujące (Tabela 5.1), wpływające na przebieg procesu utwardzania, takie jak: plastyfikatory, koalescenty, środki powierzchniowo czynne, środki tiksotropujące, antyutleniacze, napelniacze o specjalnych właściwościach i inne [18, 63].

Plastyfikatory dodaje się w celu przesunięcia zakresu temperatury, w którym polimer wykazuje właściwości kauczukopodobne, w kierunku niższej temperatury. Przykładowo stosuje się dodatek plastyfikatorów w celu uzyskania elastycznej spoiny klejowej w niższej temperaturze. W przypadku klejów dyspersyjnych dodatek plastyfikatorów ułatwia tworzenie się jednorodnego filmu (błony) w trakcie wysychania, przy czym można stosować także koalescenty, które są rozpuszczalnikami polimeru i jednocześnie mieszają się z wodą [24].

Do kompozycji klejowej dodaje się także napelniacze [18]. Powodują one najczęściej wzrost odporności chemicznej i termicznej polimeru (tym samym spoiny klejowej), a także obniżają cenę wsadu surowcowego kleju. Szczególnym rodzajem napelniaczy są różnego rodzaju siatki, włókna, maty wykonane z metalu, polimerów, włókien szklanych lub węglowych, które stanowią konstrukcyjne wzmocnienia połączenia klejowego [18, 63, 73].

Tabela 5.1. Przykładowe środki modyfikujące kleje i ich podstawowe właściwości

Środki modyfikujące	Właściwości
Plastyfikatory (zmiękczacze)	zwiększenie odkształcalności i sprężystości, zmniejszenie twardości, zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie
Środki powierzchniowo-czynne	ułatwienie zwilżania powierzchni ciał stałych
Środki tiksotropujące	nadanie właściwości tiksotropowych
Stabilizatory	podwyższenie stabilności - odporności na starzenie w warunkach użytkowania, przetwórstwa oraz przechowywania
Napelniacze	zmiana różnorodnych właściwości: np. zmniejszenie efektu egzotermicznego, zwiększenie żywotności kompozycji klejowej, zmniejszenie kosztów
Antyutleniacze	podwyższają odporność na starzenie oksydacyjne

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10, 54, 63, 73]

Niekiedy do kompozycji klejowej wprowadza się także promotory adhezji, których struktura powinna umożliwić ich dyfundowanie do granicy faz spoina-materiał klejony i tam oddziaływać fizycznie lub chemicznie na powierzchnię łączonego materiału [24, 40, 50].

Istotnym elementem procesu sporządzania masy klejowej jest unikanie wprowadzania do niej pęcherzy powietrza. Obecność tych pęcherzy po procesie utwardzania, może przyczynić się do powstania wad w spoinie klejowej, co prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości połączeń klejowych.

Kolejnym ważnym czynnikiem w tej operacji jest czas życia masy klejowej (kleju). Jest to czas liczony od momentu przygotowania kleju, w ciągu którego klej zachowuje swoje właściwości [24].

Właściwości większości klejów mogą ulegać zmianie w czasie lub tuż po otwarciu opakowania (np. w przypadku klejów rozpuszczalnikowych lub utwardzających się z wilgocią z powietrza), albo też dopiero po wymieszaniu z utwardzaczem (dla większości klejów dwuskładnikowych). Dotyczy to zwłaszcza właściwości higroskopijnych kompozycji klejowych, na przykład kompozycji epoksydowych łączonych z utwardzaczem Z1 [17].

5.2. Rodzaje i właściwości klejów

W zależności od właściwości i przeznaczenia istnieje kilka kryteriów podziału klejów [12, 17, 24, 65]. Jedno z kryteriów uwzględnia pochodzenie głównego składnika klejów. Wyróżnia się kleje [17]:

- syntetyczne: akrylowe, aminowe, cyjanoakrylowe, epoksydowe, fenolowe i rezorcynowe, kauczukowe, poliuretanowe, oparte na polichlorku winylu, polioctanowinyłowe;
- pochodzenia naturalnego: glutenowe, kazeinowe, skrobiowe, z pochodnych celulozy i inne.

W zależności od ilości składników tworzących kompozycję klejową, kleje dzielą się na jednoskładnikowe i wieloskładnikowe.

Z uwagi na zewnętrzną postać, można wymieniać kleje [12, 16]:

- ciekłe (rozpuszczalnikowe, dyspersyjne, roztwory wodne, żywice ciekłe, monomery polimeryzujące, żele),
- stałe (topliwe, żywice stałe, folie i błony klejowe, proszki i granulaty do rozpuszczania lub dyspergowania, bryły, pręty – rys. 5.1).



Rys. 5.1. Różne postacie klejów stałych [124]

Pod względem mechanizmu wiązania spoiny klejowej można dokonać podziału na kleje:

- wiążące w wyniku procesu fizycznego (np. odparowanie rozpuszczalnika lub wody, zestalenie się stopionego kleju),
- wiążące w wyniku procesu chemicznego (np. polimeryzacji, sieciowania) zachodzącego w wyniku zwiększenia temperatury (kleje termoutwardzalne), dodania utwardzacza (kleje chemoutwardzalne) lub działania innych czynników zewnętrznych (np. wilgoci – kleje cyjanoakrylowe, odcięcia dostępu tlenu – kleje anaerobowe).

Uwzględniając możliwość do uzyskania wytrzymałość połączeń klejowych można wyróżnić kleje:

- przypiepcowe – charakteryzujące się minimalną wytrzymałością wystarczającą jedynie do odwracalnego połączenia dwóch elementów,
- montażowe – odznaczające się średnią wytrzymałością umożliwiającą trwałe połączenie, która jednak nie jest wystarczająca do traktowania połączenia, jako elementu konstrukcyjnego,
- konstrukcyjne – których duża wytrzymałość pozwala na klasyfikowanie połączenia, jako elementu konstrukcyjnego.

W zależności od zakresu stosowania kleje można podzielić m. in. na kleje do metali, do tworzyw polimerowych, do drewna, do okładzin ściennych i wykładzin podłogowych, do tapet, do obuwia, do okleinowania drewna, itp.

Przedstawione kryteria podziału nie wyczerpują całkowicie tego zagadnienia. Istnieje jeszcze wiele kryteriów podziałów uwzględniających np. różne właściwości klejów. Opisane kryteria podziału są najczęściej przedstawiane w literaturze dotyczącej zagadnień technologii klejenia [9, 12, 24, 30, 42].

Istotny wpływ na właściwości połączeń klejowych ma budowa chemiczna podstawowego składnika każdego kleju (polimeru, monomeru lub żywicy). Od tego składnika zależy adhezja, kohezja spoiny, odporność spoiny na działanie czynników zewnętrznych (temperatury, wody, tlenu, promieniowania UV, różnych czynników chemicznych). Bardzo duże znaczenie ma stopień usieciowania polimeru w spoinie klejowej oraz jego struktura przestrzenna. W cząsteczkach polimerów, żywic i monomerów obecne są ugrupowania o określonej strukturze chemicznej. Najczęściej spotyka się w nich ugrupowania lub podstawniki: estrowe, hydroksylowe, aminowe lub iminowe, karboksylowe, acetalowe, epoksydowe, izocyjanianowe, uretanowe, mocznikowe, amidowe, nitrylowe, chlorowce. Do podstawowych rodzajów polimerów, żywic i monomerów zawierających wymienione ugrupowania lub podstawniki stanowiących spoiwa różnych klejów należą: polioctan winylu (PVAC) i kopolimery octanu winylu, poliakrylany i polimetakrylany oraz niektóre kopolimery, poliwinylacetale, poliamidy (PA), polichlorek winylu (PVC), kauczuki, nasycone i nienasycone żywice poliestrowe, poliuretany (PUR) i izocyjaniany, żywice fenolowe i aminowe, żywice epoksydowe, monomery akrylowe i metakrylowe [24, 58].

Kleje epoksydowe dzięki swym specyficznym właściwościom należą do jednych z najlepszych materiałów klejowych [10, 17, 18]. Przewyższają właściwościami większość innych spoiw, wśród których wyróżniają się bardzo dobrą adhezją i odpornością chemiczną. Duża różnorodność żywic i utwardzaczy oraz możliwość modyfikowania właściwości klejów epoksydowych pozwala na wybór kompozycji klejowej najodpowiedniejszej dla danego materiału oraz warunków pracy [18]. Obecność polarnych grup wodorotlenkowych i eterowych powoduje doskonałą adhezję do metali i innych materiałów o charakterze polarnym lub łatwo ulegającym polaryzacji. Żywice epoksydowe usieciowują się (utwardzają) poprzez reakcję zawartych w nich grup epoksydowych lub wodorotlenowych z aminami lub bezwodnikami kwasowymi.

Kleje anaerobowo–stykowe do metali są klejami na podstawie estrów metaakrylanowych. W warunkach beztlenowych (anaerobowych) np. w ściśle przylegających do siebie powierzchniach oraz w obecności katalizatora (jonów niektórych metali, np. żelaza lub miedzi), następuje bardzo silna reakcja polimeryzacji, prowadząca do całkowitego usieciowania spoiny. W przypadku, gdy kleje te znajdują się w warunkach tlenowych, nie ulegają utwardzeniu. Wynika to z inhibującego działania tlenu w procesie polimeryzacji tych monomerów – powoduje on powstanie mało reaktywnych wolnych rodników. Utwardzone kleje anaerobowe charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością mechaniczną i odpornością termiczną oraz chemiczną [17].

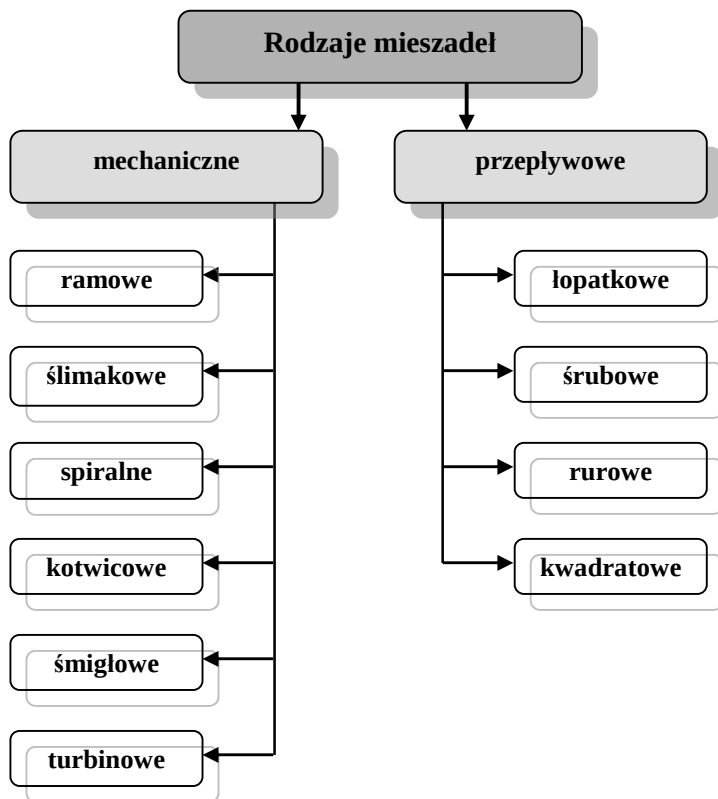
Kleje poliuretanowe są rozpowszechnionymi klejami specjalistycznymi [24]. Często wystarcza nawet niewielki dodatek do innych klejów (głównie do kauczukowych), aby właściwości klejące uległy znacznej poprawie. Kleje poliuretanowe powstają w wyniku reakcji chemicznej związku wielowodorotlenkowego ze związkiem zawierającym kilka grup izocyjanianowych. Jako spoiwa klejowe stosuje się poliuretany usieciowane. Są to kleje w przeważającej większości dwuskładnikowe. Składnik A zawiera alkohol wielowodorowy lub poliester, a składnik B – izocyjanian. Wiązanie (sieciowanie) kleju następuje w wyniku reakcji chemicznej pomiędzy składnikami kleju – grupy izocyjanianowe reagują z wodorami grup wodorotlenowych poliolu. Ciekły klej przechodzi w stan stały i najczęściej jest nierozpuszczalny. Składniki kleju dobierane są w zależności od zastosowania.

5.3. Charakterystyka urządzeń do mieszania klejów

Kompozycja klejowa może być sporządzana w mieszalnikach za pomocą odpowiednich mieszadeł mechanicznych lub przepływowych oraz przepływowych głowic mieszających [12, 17, 30, 42, 58]. Mieszadła mogą być statyczne i dynamiczne. Wybór odpowiedniej konstrukcji mieszadła oraz mieszarek zależy przede wszystkim od lepkości wytwarzanej kompozycji oraz od wymaganej wydajności procesu. W pracy [42] przedstawiono przykładowe zalecenia doboru typu mieszadła mechanicznego w zależności od lepkości mieszaniny cieczy.

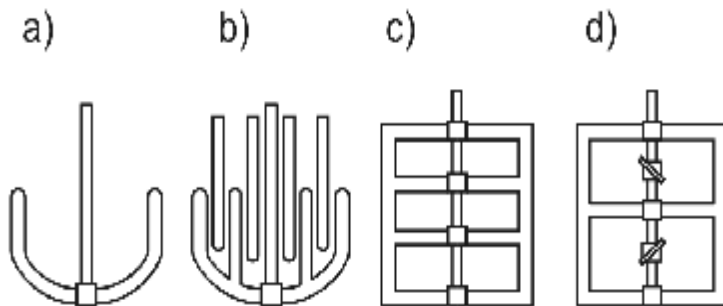
Kleje wieloskładnikowe (najczęściej kleje w postaci ciekłej lub półpłynnej) złożone są z wielu składników, m.in.: z żywicy (substancji klejącej), utwardzacza, aktywatora lub katalizatora procesu sieciowania, substancji modyfikujących i innych składników dodatkowych. Przed naniesieniem na łączone powierzchnie wymienione składniki należy połączyć i wymieszać, aby uzyskać masę (kompozycję) klejową.

Do tego celu wykorzystywane są różnego rodzaju mieszalniki. Sporządzanie kleju w mieszalnikach wykorzystujących mieszadła mechaniczne, odbywa się na skutek ruchu obrotowego części roboczej urządzenia, tj. specjalnie ukształtowanych łopatek, śmigieł, kotwic, śrub mieszających itp., które wirując z odpowiednią prędkością, doprowadzają do ujednolodnienia składu chemicznego poszczególnych składników masy klejowej. Klasyfikacja mieszadeł stosowanych w operacji przygotowania kleju zaprezentowano na rys. 5.2. Natomiast przykłady typowych mieszadeł mechanicznych stosowanych podczas przygotowania kleju przedstawiono na rys. 5.3 oraz 5.4.



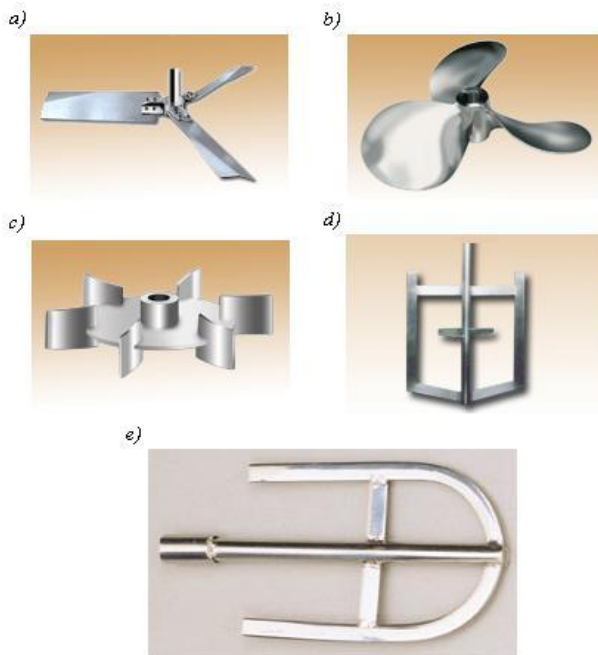
Rys. 5.2. Klasyfikacja mieszadeł stosowanych w operacji przygotowania kleju

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [42,30,58]



Rys. 5.3. Przykłady rozwiązań mieszadeł kotwicowych i ramowych: a) mieszadło kotwiczne o kształcie eliptycznym, b) mieszadło kotwiczne z palcami oraz przegrodami pionowymi, c) mieszadło ramowe, d) mieszadło ramowe z zabudowanymi dodatkowymi mieszadłami łapowymi

Źródło: Opracowanie na podstawie [42]



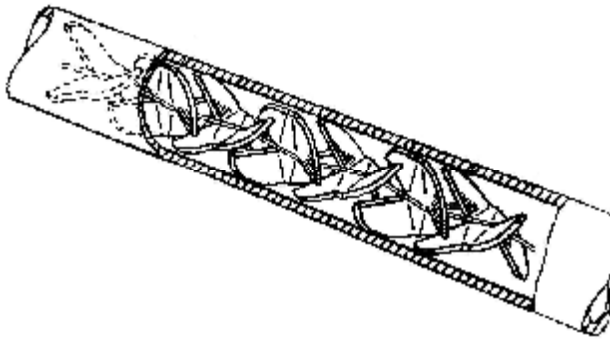
Rys. 5.4. Przykłady konstrukcji mieszadeł wykorzystywanych w mieszalnikach do sporządzania masy klejowej: a) mieszadło śmigłowe, b) mieszadło śrubowe, c) mieszadło łopatkowe, d) mieszadło ramowe, e) mieszadło kotwiczne [92]

Proces mieszania może odbywać się również za pomocą przepływowych głowic mieszających. Wykorzystywane w operacji sporządzania masy klejowej mieszadła przepływowe charakteryzują się tym, że mieszanie poszczególnych składników kleju następuje wskutek ich przepływu przez odpowiednio ukształtowaną cylindryczną komorę. Komora ta może być dodatkowo ogrzewana, a jej kształt, długość oraz średnica części roboczych dobierane są w zależności od rodzaju kleju (uwzględniając zwłaszcza jego lepkość) i wymaganej wydajności procesu mieszania. Przykłady różnych rozwiązań konstrukcyjnych mieszadeł przepływowych przedstawiono na rys. 5.5 oraz rys. 5.6.

a)



b)

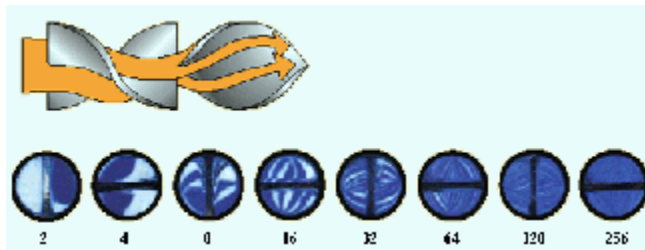


Rys. 5.5. Przykładowe mieszadła do kleju: a) łopatkowe [92], b) kratowe (kwadratowe) [102]

a)



b)



Rys. 5.6. Przepływowe mieszadła do kleju: a) śrubowe, b) schemat działania mieszadła śrubowego [9,102]

Charakterystyczną zaletą tego typu urządzeń, jest możliwość uzyskania prawie 100% wymieszania składników kleju bez ich kontaktu z powietrzem atmosferycznym. Dzięki temu ogranicza się powstawanie pęcherzyków powietrza wpływających na zmniejszenie wytrzymałości spoiny klejowej. Podział strumienia kleju zależy wykładniczo od liczby sekcji mieszających części roboczej urządzenia [42].

$$N=2^E \quad (5.1)$$

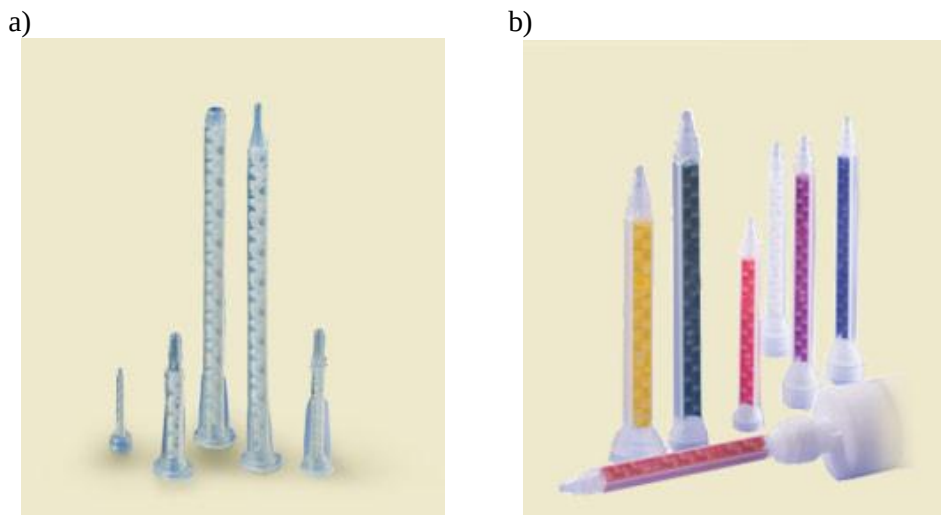
gdzie: N – liczba strumieni,

E – liczba sekcji mieszających.

Istotę mieszania w śrubowym mieszalniku przepływowym (rys. 5.6 a) przedstawiono na rys. 5.6 b. Mieszalnik ten zbudowany jest z ośmiu sekcji miesza-

jących, w których przepływające pod odpowiednim ciśnieniem, poszczególne składniki substancji klejowej ulegają wymieszaniu. Zgodnie ze wzorem (5.1) liczba podziałów wynosi 256. W wyniku tego otrzymuje się kompozycję klejową o dużym stopniu homogeniczności.

Proces mieszania klejów można realizować także za pomocą różnego rodzaju mieszalników, współpracujących z urządzeniami do dozowania w postaci pistoletów klejowych (podrozdział 5.4). Na rynku istnieje wiele firm oferujących różnego typu mieszalniki. Są to zarówno mieszalniki jednorazowe (rys. 5.7), jak i wielokrotnego użytku (rys. 5.8).



Rys. 5.7. Mieszalniki statyczne: a) okrągłe, b) kwadratowe [117]

Mieszanie składników w mieszalnikach kwadratowych realizowane jest poprzez podział i ponowne połączenie w jednorodny strumień kleju przechodzący przez szereg elementów umieszczonych pod zmieniającymi się kątami. Elementy mieszające wykonane są z acetalu lub polipropylenu, stosowanym materiałem na obudowy mieszalników natomiast jest polipropylen lub nylon. W mieszalnikach spiralnych występują spirale, które mogą obracać się w prawo lub w lewo, dzięki czemu jest zapewnione dokładne wymieszanie kleju.

Konstrukcja kwadratowych mieszalników składa się z elementów lewo- i prawoskrętnych z przemiennikami przepływu przerywanego, które prowadzą płyny od ścian do środkowej części mieszalnika i ze środka w kierunku ścian w celu dokładnego i całkowitego wymieszania.



Rys. 5.8. Mieszalniki wielokrotnego użytku [117]

Mieszalniki wielokrotnego użytku (rys. 5.9), najczęściej wykonane są z metalu, przy czym elementy mieszające mogą być metalowe lub polimerowe. Mieszalniki metalowe zazwyczaj wyposażone są w gwintowane rurki na obydwu końcach, aby ułatwić podłączenie ze stanowiskiem, w którym przygotowywany jest klej.

5.4. Charakterystyka urządzeń do dozowania klejów

Podczas sporządzania kompozycji klejowej (zwłaszcza klejów wieloskładnikowych) konieczne jest także odpowiednie dozowanie poszczególnych jej składników. Do tego celu można wykorzystać zarówno różnego rodzaju dozowniki, pistolety wyposażone w dysze zapewniające dozowanie i wymieszanie składników, wagi oraz urządzenia dozujące i przygotowujące masę klejową. Często urządzenia do dozowania klejów są jednocześnie urządzeniami do ich nakładania [12, 24, 42, 60].

Wyróżnia się trzy podstawowe metody dozowania składników kleju:

- ręczne,
- półautomatyczne,
- automatyczne.

Dozowanie ręczne polega na ręcznym przygotowaniu kompozycji klejowej, przy wykorzystaniu różnego rodzaju wag technicznych, naczyń do mieszania, wkraplaczy oraz mieszadeł. Z tego względu, że proces ten jest stosunkowo czasochłonny, a niekiedy też może stwarzać pewne problemy pod względem warunków technicznych sporządzania mieszanki klejowej (czasu mieszania, temperatury kleju, wilgotności pomieszczenia itd.), wykorzystywany jest głównie w produkcji jednostkowej, bądź w naprawach i regeneracji części maszyn w warunkach warsztatowych.

Dozowanie półautomatyczne odbywa się na ogół przy wykorzystaniu różnego typu pistoletów dozujących. Podstawowym elementem ich budowy jest dwudzielna komora z równolegle umieszczonymi: żywicą i utwardzaczem. Dozowanie następuje wskutek ręcznego, bądź pneumatycznego nacisku tłoka na naboje zawierające poszczególne składniki kleju. Dodatkowo przyrządy te bardzo często zawierają wymienne mieszalniki statyczne, co znacznie usprawnia proces przygotowania kleju do bezpośredniego użycia. Przykłady typowych półautomatycznych dozowników kleju przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Półautomatyczne dozowniki do kleju [85]

Z uwagi na szybki rozwój technologii klejenia, coraz większe znaczenie w procesie sporządzania masy klejowej odgrywa dozowanie automatyczne. Do tego celu stosuje się między innymi zautomatyzowane systemy dozująco-nakładające, w których dawkowanie poszczególnych składników kleju przebiega dużo bardziej precyzyjnie niż w metodzie ręcznej i półautomatycznej. Na rys. 5.10 przedstawiono przykłady automatycznych dozowników do klejów sterowanych elektronicznie.



Rys. 5.10. Automatyczne systemy dozujące [76]

Zaletą urządzeń tego typu jest możliwość ich stosowania na oddzielnych liniach montażowych, w których proces dozowania często przebiega bez udziału operatora. Dozowniki te nie wymagają konieczności odpowietrzania, a proces dozowania jest dokładny i powtarzalny.

Innym przykładem automatycznego dozownika (pistoletu) z mieszalnikiem statycznym zamieszczono na rys. 5.11. Elementem podstawowym dozownika na (rys. 5.11) jest dwukomorowy nabój „Cartridge” z umieszczonymi w równoległych tłokach żywicą i utwardzaczem.



Rys. 5.11. Pistolet dozujący do kleju [74]

Elementem dozującym może być ręczny lub pneumatyczny aplikator z ruchomym elementem dociskającym równolegle tłok żywicy i utwardzacza. Zastosowano również w tym dozowniku mieszalnik statyczny jednorazowego użytku (rys. 5.7). Ponadto użycie pistoletu pneumatycznego umożliwia jego wykorzystanie w produkcji seryjnej, do nakładania kleju punktowo w sposób ciągły.

Stosowane są także pistolety wykorzystujące naboje zawierające termo-utwardzalne lub termoplastyczne kleje. Takie urządzenia wyposażone są w instalacje grzejne, w których następuje podgrzanie naboju do temperatury topnienia kleju, a następnie za pomocą ruchów spustu lub przy użyciu sprężonego powietrza klej jest wyciskany z naboju. Przechodząc przez dyszę klej jest dogrzewany i utwardza się po naniesieniu na klejoną powierzchnię. Przykładowe urządzenia przedstawiono na rys. 5.12 i rys. 5.13.

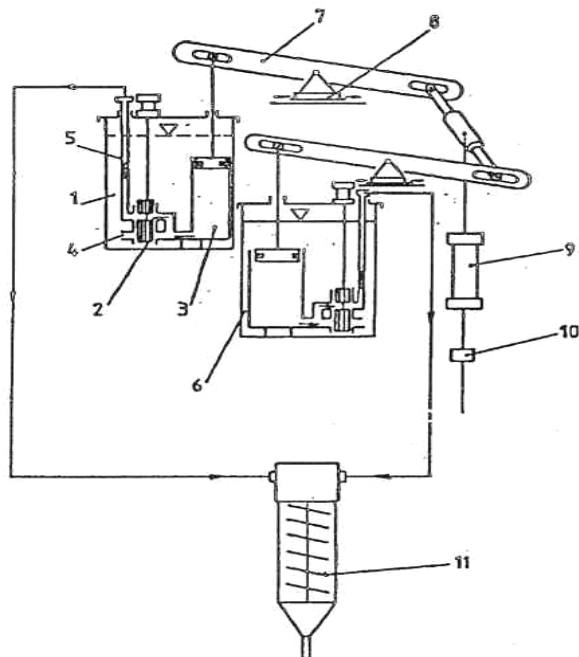


Rys. 5.12. Pistolet klejowy z uchwytem [109]

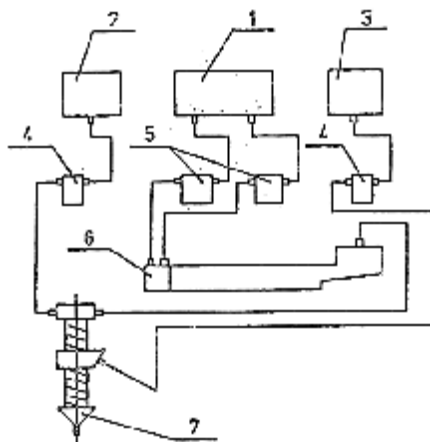


Rys. 5.13. Pneumatyczny pistolet klejowy o zwiększonym przepływie [105]

Przykładem urządzeń do dozowania określonych ilości kleju (lub intensywności jego wypływu przez dyszę dozującą) mogą być dozowniki dyskretne i ciągle wykorzystywane w montażu automatycznym w liniach montażowych [46, 76]. Schematy tych urządzeń przedstawiono na rys. 5.14 i rys. 5.15.



Rys. 5.14. Dozownik dyskretny kleju dwuskładnikowego: 1 – zbiornik żywicy, 2 – zawór zwrotny, 3 – tłoczek podajnika żywicy, 4 – kanał zasysania, 5 – kanał tłoczący, 6 – zasobnik utwardzacza, 7 – nastawne ramię, 8 – ruchoma podpora, 9 – siłownik pneumatyczny, 10 – nastawny zderzak (regulacja objętości porcji kleju), 11 – mieszadło wylotowe (statyczne) [46]



Rys. 5.15. Dozownik ciągły kleju trójskładnikowego: 1 – zasobnik żywicy, 2 – zasobnik utwardzacza, 3 – zasobnik przyspieszacza, 4,5 – pompki zębate podające ciecze w sposób ciągły, 6 – ogrzewacz strumienia, 7 – mieszadło [46]

Inną grupą urządzeń dozujących są dozowniki pneumatyczne, wykorzystujące mikroprocesorowe sterowniki czasowe do regulacji ilości materiału nakładanego na łączone elementy (rys. 5.16).

a)



b)



Rys. 5.16. Urządzenia dozujące: a) z napędem pneumatycznym, b) końcówki dozujące [117]

Urządzenia dozujące mogą być wyposażone w końcówki o różnych wzorach, rozmiarach oraz mogą być wykonane z różnych materiałów. Wśród nich można wyróżnić:

- końcówki stożkowe – które zapewniają szybkie i równomierne aplikowanie klejów (oraz innych cieczy) o średniej oraz wysokiej lepkości – zwłaszcza cieczy gęstych i wypełnionych cząsteczkami, takimi jak żywice epoksydowe, silikony, przy czym końcówki te mogą być elastyczne (zawierające dodatki blokujące przenikanie światła) oraz sztywne (chroniące płyny wrażliwe na promieniowanie UV i zapewniające dokładne pozycjonowanie w zautomatyzowanych procesach dozujących);
- końcówki elastyczne – są one często wykonane z polipropylenu, a umożliwiają dozowanie i aplikację w trudnodostępnych miejscach oraz nie powodują uszkodzeń powierzchni o niewielkiej sztywności, przy czym cechują się łatwością zmiany ich wymiarów poprzez cięcie na żądany wymiar lub wygięcie;
- końcówki kątowe – występują w wariantach wygiętym pod kątem 45° i 90° i najczęściej wykonane ze stali nierdzewnej;
- końcówki szczotkowe – oprócz aplikacji służą także do rozprowadzania klejów na powierzchni i występują w wariantach z miękkim oraz sztywnym włosiem;

- końcówki ze ściętymi skośnie otworami – ułatwiają wprowadzanie kleju pomiędzy powierzchnie o niewielkiej grubości, zwłaszcza klejów o niskiej lepkości;
- końcówki owalne – służą do nakładania klejów o dużej gęstości, past oraz uszczelniaczy w postaci płaskich wstęg;
- końcówki z tulejkami z PTFE – zastosowana w końcówce tulejka wykonana z PTFE, umieszczona wewnątrz zaciskającego ją trzonu stalowego, eliminuje zapychanie się końcówek podczas stosowania klejów, zwłaszcza cyjanoakrylowych oraz zapewnia dodatkową kontrolę podczas dozowania klejów o niskiej lepkości.

Inną grupą urządzeń dozujących stanowią roboty dozujące kleje (rys. 5.17), stanowiące elementy składowe urządzeń stacjonarnych zautomatyzowanych, które mogą pracować w liniach technologicznych także podczas produkcji seryjnej. Zautomatyzowane stacjonarne systemy dozujące zapewniają powtarzalność precyzyjnej aplikacji klejów oraz mas uszczelniających (także środków smarnych) w wielu procesach montażowych i wytwórczych. Przy pomocy specjalistycznego oprogramowania, systemy robotów EFD są łatwe do programowania i podlegają szybkiej konfiguracji. System rzeczywistego sterowania ruchem trój- i czterowymiarowym pozwala na łatwe zaprogramowanie kropel, ścieżek, łuków, łuków złożonych oraz wzorów w różnych płaszczyznach.

Roboty dozujące EFD są elastyczne i mogą pracować, jako jednostki pojedyncze lub elementy linii zautomatyzowanych oraz charakteryzują się łatwością integrowania w systemy przemieszczania w ramach linii technologicznych, stołów obrotowych oraz linii montażu paletowego.



Rys. 5.17. Przemysłowy robot dozujący kleje firmy EFD [117]

Zastosowanie tego rodzaju urządzeń dozujących zautomatyzowanych przyczynia się do podniesienia jakości i zwiększenia wydajności produkcji.

Urządzenia dozujące mogą stanowić odrębne stanowiska, które można ustawić w liniach synchronicznych lub asynchronicznych [117]. W pracach [17, 24, 42, 46, 62] opisano i przedstawiono różne odmiany urządzeń do dozowania, które charakteryzują się różnorodną konstrukcją oraz możliwością zastosowania w różnych warunkach produkcyjnych.

5.5. Charakterystyka urządzeń do nakładania klejów

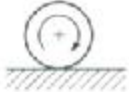
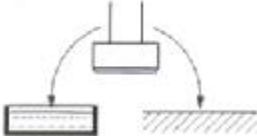
5.5.1. Sposoby nakładania klejów w różnej postaci

Proces nakładania kleju, wybór metody nakładania oraz wykorzystywane przyrządy, narzędzia i urządzenia zdeterminowany jest następującymi czynnikami, m.in. [17, 30, 46, 62]:

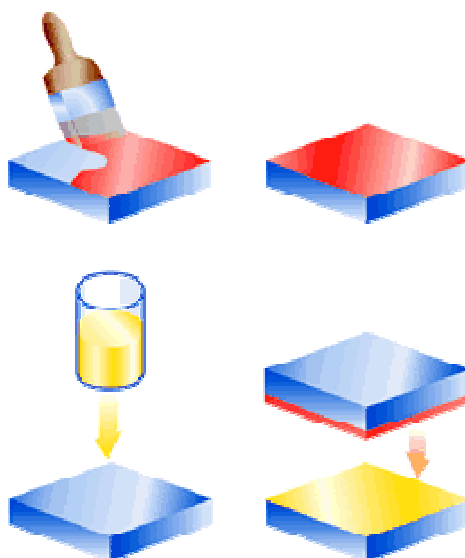
- ilością składników kleju,
- postacią przygotowywanego kleju,
- właściwościami kleju, a zwłaszcza jego lepkością,
- rodzajem, wielkością i ukształtowaniem powierzchni łączonych elementów,
- dostępnością do łączonych powierzchni,
- rodzajem produkcji (jednostkowa, seryjna, masowa),
- możliwościami warsztatowymi.

Jednym z czynników wpływających na wybór metody aplikacji klejów jest postać kleju. Przykładowe metody nanoszenia klejów w stanie ciekłym zamieszczono w tabeli 5.2. Niektóre metody nanoszenia ciekłych klejów dwuskładnikowych zaprezentowano na rys. 5.18–5.23. Kleje dwuskładnikowe można nakładać po zmieszaniu poszczególnych składników kleju na jedną lub na obie łączące powierzchnie. Istnieje także możliwość nakładania poszczególnych składników kleju oddzielnie na każdą z łączonych powierzchni i dopiero wówczas po złożeniu obu powierzchni następuje reakcja utwardzania kleju.

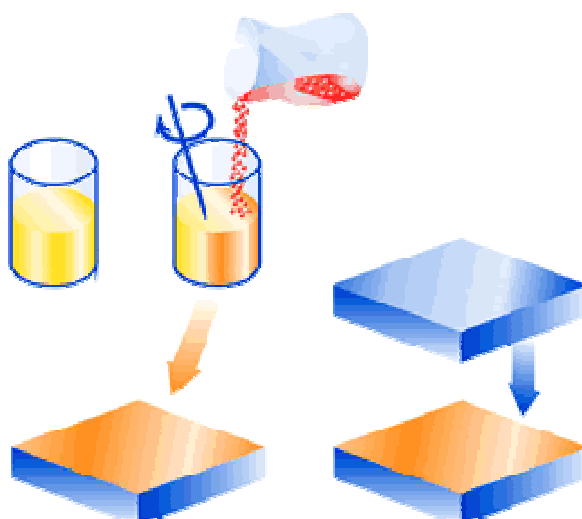
Tabela 5.2. Metody nakładania klejów ciekłych

Metoda	Schemat graficzny
Natryskiwanie	
Zanurzanie	
Nakładanie w postaci kropli	
Walcowanie	
Nakładanie wstęgą	
Nakładanie pędzlem	
Nakładanie szpachlami: płaską i poząbkowaną	
Tamponowanie	

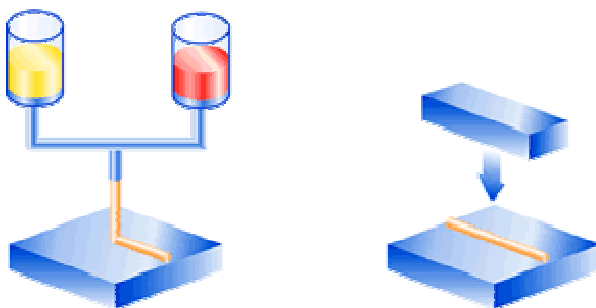
Źródło: opracowanie własne na podstawie [30]



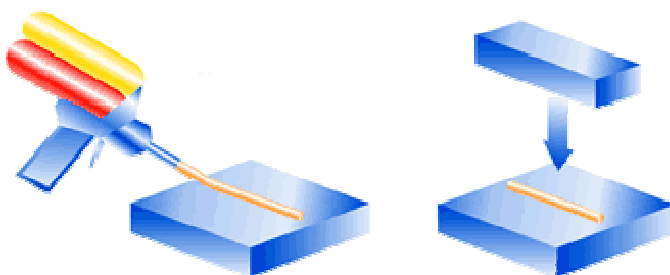
Rys. 5.18. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego – nanoszenie składników kleju osobno na łączone powierzchnie [118]



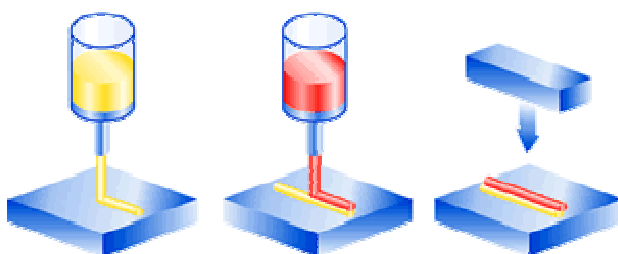
Rys. 5.19. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego – nanoszenie przygotowanego kleju na jedną z łączonych powierzchni [118]



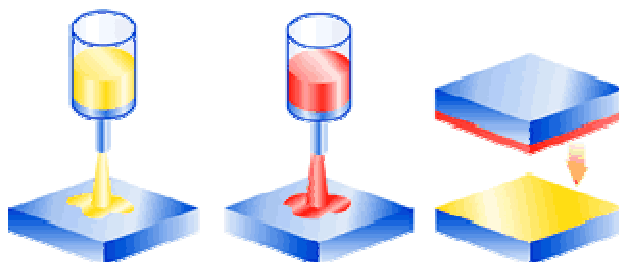
Rys. 5.20. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego z wykorzystaniem dozownika z automatycznym mieszaniem dwóch składników kleju na jedną z łączonych powierzchni [118]



Rys. 5.21. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego z wykorzystaniem ręcznego lub pneumatycznego pistoletu dozującego na jedną z łączonych powierzchni [118]



Rys. 5.22. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego w postaci wstęgi z wykorzystaniem oddzielnych dozowników poszczególnych składników kleju na jedną z łączonych powierzchni [118]



Rys. 5.23. Przykład nanoszenia kleju dwuskładnikowego z wykorzystaniem oddzielnych dozowników poszczególnych składników kleju, na każdej powierzchni osobno [118]

Charakterystyczną cechą klejów stałych (występujących w postaci brył, prętów, błon lub proszków) jest zdolność mięknięcia w miarę podgrzewania oraz przechodzenia w stan ciekły po przekroczeniu tzw. temperatury topnienia, wówczas osiągają zdolność zwilżania. Zbyt krótkotrwałe podgrzanie kleju powoduje, że jest to proces odwracalny. Natomiast utrzymywanie kleju w temperaturze wyższej od temperatury topnienia zapoczątkowuje proces tężenia, czyli tzw. reakcję utwardzania się.

W przypadku nanoszenia kleju w postaci bryły pociera się nim rozgrzaną powierzchnię klejonego przedmiotu, na której osadza się warstwa stopionej substancji. Sposób ten jednak nie zapewnia równomiernego osadzenia kleju, dlatego częściej stosuje się mielenie kleju na proszki, którymi posypuje się rozgrzaną lub zimną powierzchnię klejonego przedmiotu. W przypadku nakładania na powierzchnie zimne, proces nanoszenia przeprowadza się w różnego typu komorach grzewczych (np. suszarkach). Posypane klejem materiały, umieszcza się w komorach grzewczych i ogrzewa do momentu roztopienia kleju w postaci proszku [42].

Kleje w postaci pręta nanoszone są poprzez natryskiwanie płomieniowe z odpowiednich pistoletów. Koniec pręta, który wystaje z dyszy pistoletu ulega stopieniu w płomieniu palnika, a roztopiony klej za pomocą wydmuchiwanego strumienia sprężonego powietrza w postaci drobnych kropelek zostaje rozpylony na powierzchni przeznaczonej do klejenia.

W przypadku klejów stałych najwygodniejszą postacią kleju do nanoszenia i dawkowania jest błona (film klejowy, transfer) (rys. 5.24 i rys. 5.25).



Rys. 5.24. Błona kleju w taśmie [110]



Rys. 5.25. Błona kleju w taśmie na rolce [125]

Najczęściej taśma klejowa osłonięta jest jedno- lub dwustronnym różnorodnym materiałem (np. ceratką, papierem silikonowym) (rys. 5.26).



Rys. 5.26. Taśma klejowa z widoczną osłoną [88]

Błony klejowe najczęściej występują w postaci taśm o różnej szerokości, które można wykorzystać w zależności od szerokości do bezpośredniej aplikacji na łączone powierzchnie. Z błony klejowej może być wycinany zarys łączonych elementów, który następnie umieszczany jest na powierzchni przeznaczonej do klejenia.

Błony klejowe mogą być produkowane w postaci:

- czystej błony klejowej,
- błony wzmocnionej (np. siatką poliestrową, włókniną),
- na nośnikach w postaci bibuły, folii lub innych,
- z przekładką papierową bądź foliową.

Rodzaj i ilość (gramatura) kleju, rodzaj wzmocnienia oraz rodzaj nośnika jest uzależniony m.in. od zastosowania kleju w postaci błony.

Kleje w postaci taśm mogą być nakładane na klejone powierzchnie z wykorzystaniem specjalnego aplikatora, który zdejmuje ochronną warstwę materiału oraz umożliwia odcinanie taśmy na określony wymiar.

Błony mogą zawierać zatopione w nich włókniny, które mogą być wykonane np. z wytrzymałych przędzy szklanych. Włókniny wpływają na poprawę wytrzymałości kohezyjnej spoin oraz umożliwiają regulowanie ich grubości. Podczas utwardzania kleju, gdy sklejane powierzchnie zostaną odpowiednio obciążone, błona klejowa w temperaturze utwardzania ulega roztopieniu, a sklejane powierzchnie zbliżają się do siebie i osiadają na niciach włókniny, dlatego ich grubość decyduje o grubości spoiny klejowej niezależnie od stosowanych nacisków. Ponadto włókniny mogą przeciwdziałać nadmiernemu wypływowi masy klejowej z miejsca połączenia.

5.5.2. Ręczne i automatyczne nakładanie klejów

Operację nakładania kleju można przeprowadzić zarówno ręcznie, jak i automatycznie. Ręczne nanoszenie klejów stosowane jest najczęściej przy klejeniu niewielkich powierzchni, w produkcji jednostkowej oraz w warunkach warsztatowych. Przy ręcznym nanoszeniu klejów w postaci płynnej można wykorzystywać wałki (rys. 5.27 a) oraz płaskie pędzle malarskie wykonane z naturalnego włosia o średniej sztywności (rys. 5.27 b). Masa klejowa powinna być w tym przypadku наносzona za pomocą jednego pociągnięcia pędzla (co zapobiega dostaniu się pęcherzyków powietrza do masy klejowej), a prędkość powinna być odpowiednio dobrana w zależności od lepkości kleju.

a)



b)



Rys. 5.27. Narzędzia do ręcznego nakładania kleju: a) pędzle malarskie płaskie [113], b) wałki [108]

W przypadku klejów o większej lepkości, np. w postaci past, do aplikacji klejów można wykorzystać szpachelki malarskie o odpowiednio ukształtowanej krawędzi (rys. 5.28). Krawędzie szpachelki powinny posiadać nacięcia w kształcie ząbków, w celu uzyskania równomiernej warstwy.

a)



b)



Rys. 5.28. Widok: a) szpachli malarskiej poząbkowanej, b) rozprowadzania kleju za pomocą poząbkowanej szpachli [88]

Do ręcznego rozprowadzania kleju można wykorzystać także inne nakładarki ręczne, zaprezentowane na rys. 5.29 oraz na rys. 5.30.

a)



b)

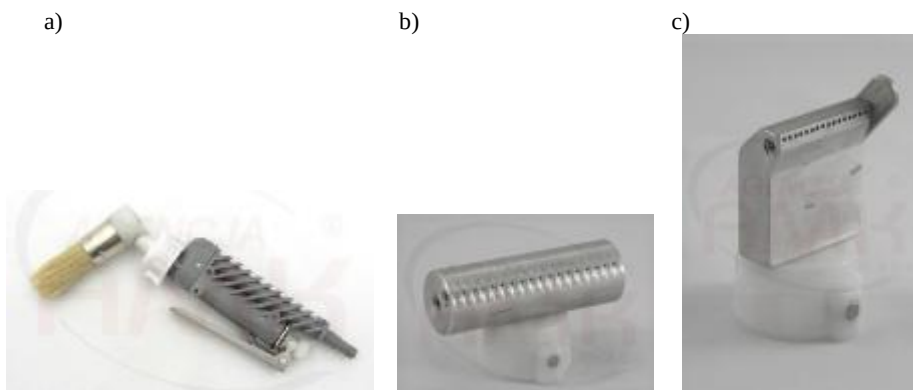


Rys. 5.29. Nakładarki ręczne kleju z: a) pędzlem, b) walkiem gąbczastym [109]



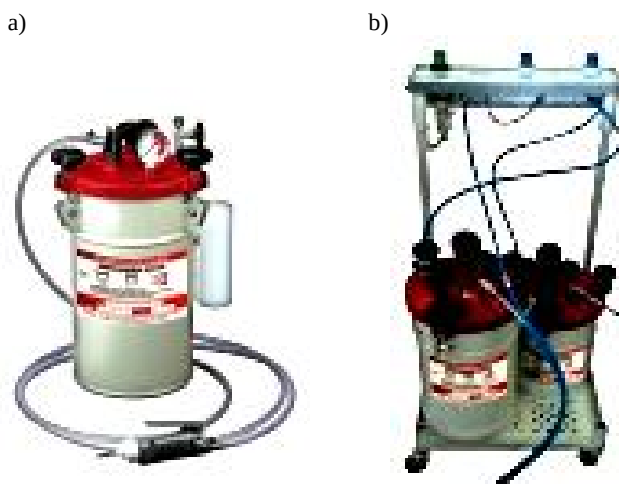
Rys. 5.30. Stacjonarna nakładarka kleju z górną rolką dociskową [109]

Zastosowanie różnego rodzaju dysz, stanowiących jeden z elementów wyposażenia pistoletów do mieszania, dozowania i nakładania klejów, pozwala na aplikację klejów na powierzchnie o zróżnicowanej wielkości lub konieczności ograniczenia miejsca nakładania klejów. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych dysz do nakładania klejów zamieszczono na rys. 5.31.



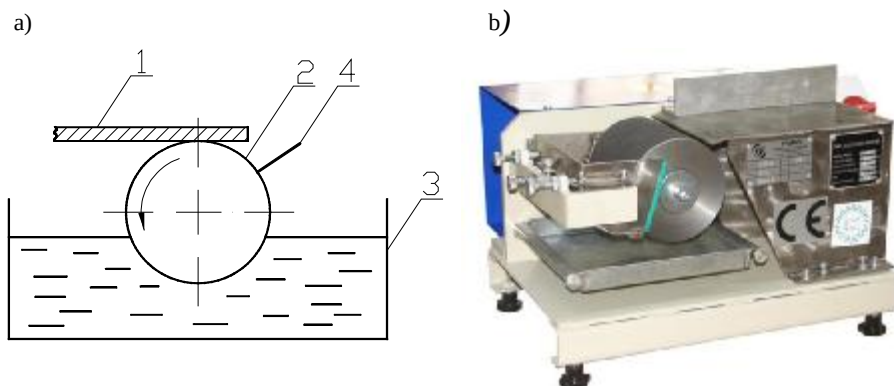
Rys. 5.31. Rodzaje dysz do nakładania klejów: a) dysza klejowa w postaci pędzla, b) dysza do powierzchni płaskich, c) dysza do wąskich płaszczyzn z bocznym ogranicznikiem [109]

W produkcji seryjnej lub masowej można stosować wałki, rozpylacze szczelinowe, powlekarki jedno- lub dwuwalcowe, nakładarki kurtynowe, również hydrauliczne, pneumatyczne lub elektrostatische urządzenia do rozpylania kleju (rys. 5.32).



Rys. 5.32. Nakładarki klejów: a) ciśnieniowa do klejów dyspersyjnych, b) do klejów dwuskładnikowych [109]

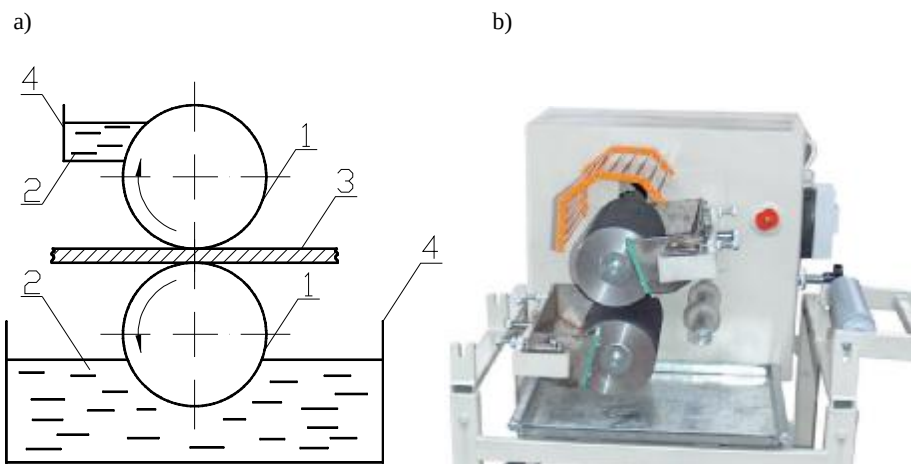
Nanoszenie klejów za pomocą wałków lub powlekarek rolkowych można stosować do przedmiotów płaskich lub mających jednokierunkową stałą krzywiznę. Do nakładania klejów w montażu automatycznym oraz w przypadku dużych powierzchni można stosować różnego typu powlekarki, wśród których można wyróżnić powlekarki walcowe i kurtynowe. Na rys. 5.33 przedstawiono zasadę działania oraz widok ogólny jednowalcowej powlekarki do kleju.



Rys. 5.33. Jednowalcowa nakładarka kleju: a) zasada działania [42], b) widok ogólny; 1 – materiał klejony, 2 – wałek, 3 – zbiornik z klejem, 4 - zbierak [90]

Nakładanie substancji klejowej na powierzchnię materiału klejonego 1, odbywa się przy pomocy obracającego się walca 2, częściowo zanurzonego w zbiorniku z klejem 3. Zamontowany na stanowisku klejarskim zbierak 4 jest przeznaczony do równomiernego rozprowadzania masy klejowej na powierzchni rolki, a także może zbierać pozostałości utwardzającego kleju. Wadą tej metody nakładania klejów, jest możliwość jednoczesnego powlekania tylko jednej powierzchni klejonego materiału.

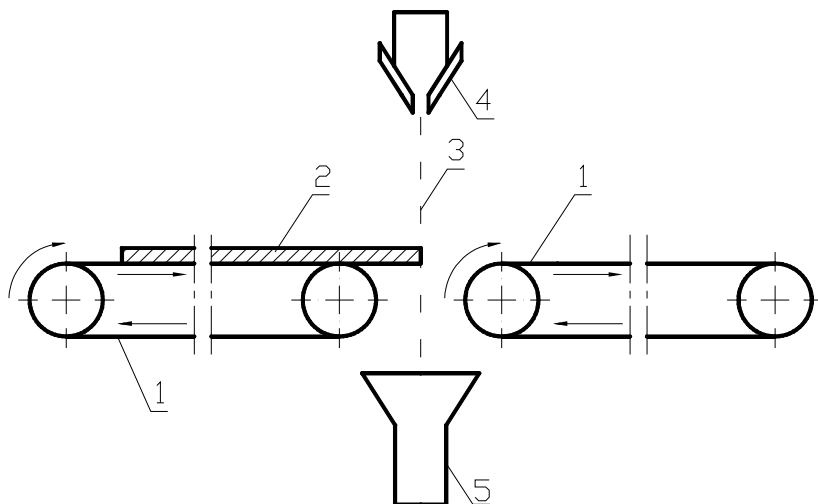
W przypadku, gdy w procesie klejenia jest konieczne jednoczesne nałożenie substancji klejowej na obie powierzchnie łączonego materiału, znacznie wydajniejszą metodą jest powlekanie przy użyciu nakładarki dwuwalcowej. Przedstawiona na rys. 5.34 nakładarka posiada dwie rolki nakładające 1 ustawione poziomo względem siebie i obracające się w przeciwnych kierunkach. Element klejony 3, w trakcie powlekania przesuwają się pomiędzy rolkami, a te z kolei pobierają klej 2 z zasobników 4.



Rys. 5.34. Dwuwalcowa nakładarka kleju: a) zasada działania [17], b) widok ogólny; 1 – walce nakładające, 2 – klej, 3 – materiał klejony, 4 – zasobniki kleju [90]

Istotną wadą ograniczającą zastosowanie metod powlekania za pomocą nakładek rolkowych, jest możliwość ich wykorzystania jedynie w przypadku klejenia przedmiotów płaskich. W metodzie tej, klej powinien być rozłożony równomiernie na całej powierzchni walca, a jego część robocza powinna cechować się dobrą zwilżalnością. W tym celu stosuje się na ogół walce powleczone warstwą gumy, która dodatkowo kompensuje niepożądane odchyłki walcowości rolek nakładających.

Powyższych wad nie posiadają powlekarki kurtynowe – rys. 5.35. W urządzeniach tego typu strumień kleju 3 spływa z głowicy o regulowanej przepustowości 4 na materiał klejony 2. Przesuw materiału klejonego jest realizowany przy pomocy przenośnika taśmowego 1, a nadmiar kleju spływa do rynny ściekowej 5.

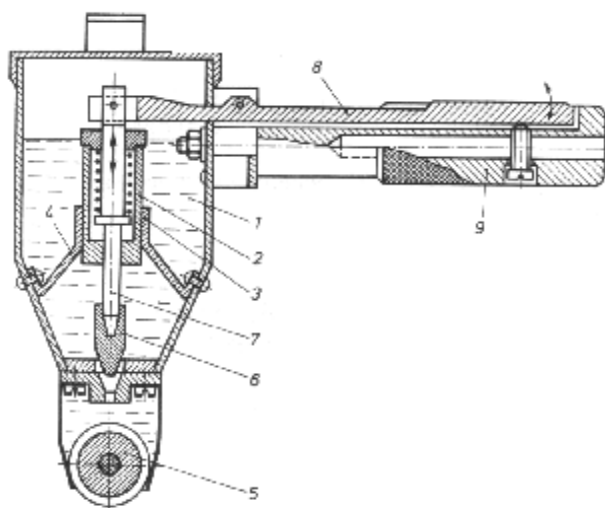


Rys. 5.35. Schemat budowy nakładarki kurtynowej: 1 – przenośnik taśmowy, 2 – element klejony, 3 – klej, 4 – regulowana głowica, 5 – rynna ściekowa [17]

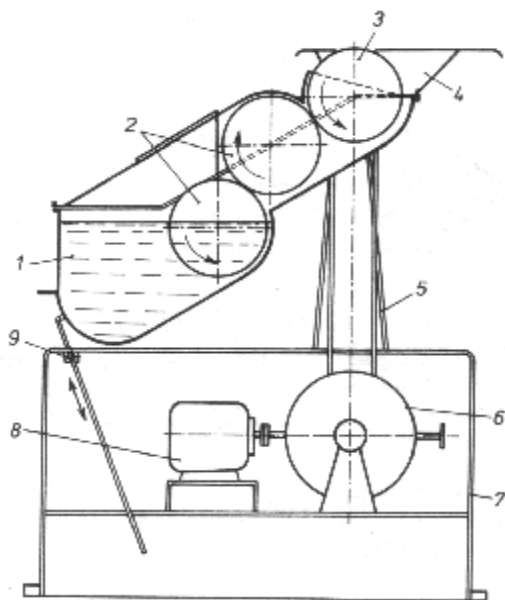
Nakładarki kurtynowe są bardziej oszczędne oraz bardziej wydajne niż powlekarki walcowe. Zapewniają również bardziej równomierne pokrycie klejem łączonych powierzchni. Wyposażone są w głowicę, w której ścieka klej przez szczelinę o regulowanej szerokości oraz przenośnik przesuwający elementy z regulowaną prędkością.

Innym rodzajem powlekarek są powlekarki przenośne (rys. 5.36) oraz powlekarki stacjonarne (rys. 5.37).

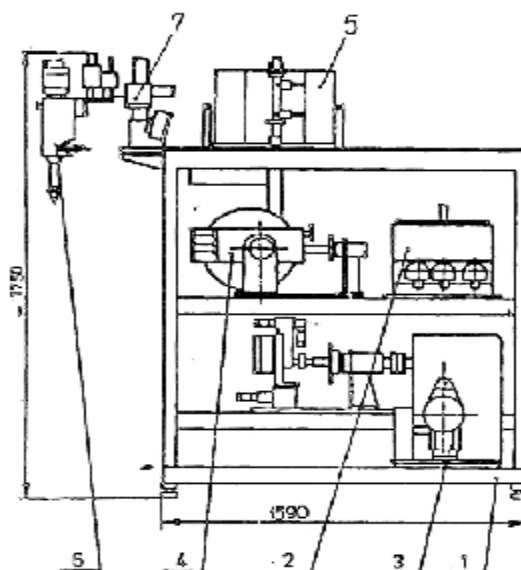
Do nakładania kleju można także wykorzystać specjalnie skonstruowane stanowiska, a schemat takiego stanowiska przedstawiono na rys. 5.38.



Rys. 5.36. Schemat powlekarki przenośnej: 1 – zbiornik kleju, 2 – tuleja, 3 – sprężyna dociiskowa, 4 – wspornik, 5 – wałek powlekający żłobkowany, 6 – grzybek zaworu, 7 – trzpień, 8 – dźwignia przyciskana ręką pracownika, 9 – rękojeść [97]



Rys. 5.37. Schemat powlekarki stacjonarnej: 1 – zbiornik kleju, 2 – walce podające, 3 – wałek powlekający, 4 – stół, 5 – stojak, 6 – przekładnia do bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej walca powlekającego, 7 – korpus, 8 – silnik elektryczny, 9 – element do regulacji położenia zbiornika kleju w zależności od ilości kleju [97]



Rys. 5.38. Stanowisko do nakładania kleju na łączone powierzchnie: 1 – korpus, 2 – ogrzewacz żywicy, 3 – napęd, 4 – dozowniki składników, 5 – zasobnik kleju, 6 – mieszadło, 7 – układ manipulacyjno-chwytakowy [46]

Innym przykładem aplikatora do nakładania kleju jest nakładarka zaprezentowana rys. 5.39.



Rys. 5.39. Nakładarka kleju topliwego [107]

Nakładarka kleju topliwego (rys. 5.39) składa się ze zbiornika, kolektora, przewodów i pistoletów oraz układu sterującego, które umożliwia programowanie parametrów pracy urządzenia. Nakładarka wyposażona jest w zbiornik z podgrzewanym ożebrowaniem wzdłuż podstawy zbiornika w celu zwiększenia wydajności topienia i łatwiejszego przepływu kleju w kierunku dna zbiornika. Wszystkie części stykające się z klejem są pokryte powłoką PTFE, która zapobiega przywieraniu kleju do powierzchni tych elementów. Różne rozwiązania nakładek do klejów topliwych przedstawiono w [107].

Kolejną grupą urządzeń do nakładania masy klejowej są rozpylacze, które mogą być powietrzne, mechaniczne, hydrauliczne, elektrostatyczne. Tę grupę urządzeń można stosować w przypadku nanoszenia klejów ciekłych i proszkowych. Rozpylenie pozwala na uzyskanie najlepszej równomierności powlekania klejem łączonych powierzchni. Podczas rozpylania klejów urządzenia najczęściej są prowadzone prostopadle do powierzchni, na której jest nakładany klej (rys. 5.40–5.41). Rozpylacze powietrzne posiadające najprostszą konstrukcję, jednak są rzadko stosowane ze względu na wiele wad, do których można zaliczyć m.in. znaczne straty klejów, duże koszty energii, zanieczyszczenie powierzchni oraz duże zużycie rozpuszczalników.

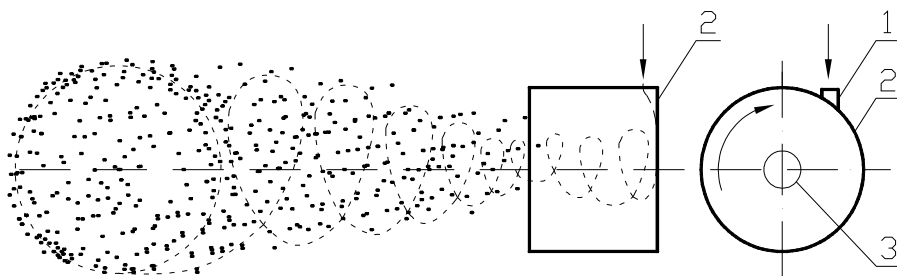


Rys. 5.40. Metoda nanoszenia kleju poprzez rozpylenie [76]



Rys. 5.41. Przykład głowicy szczelinowej firmy NORDSON [117]

W rozpylaczach mechanicznych (rys. 5.42) strumień kleju doprowadzony poprzez dyszę 1, przemieszcza się po części cylindrycznej elementu obrotowego 2, pod działaniem siły odśrodkowej. Jednocześnie na skutek powstającego ciśnienia, kierowany jest on w kierunku wylotu 3. Metoda ta pozwala na zmniejszenie zużycia kleju o ok. 20% w porównaniu z rozpylaniem powietrznym.

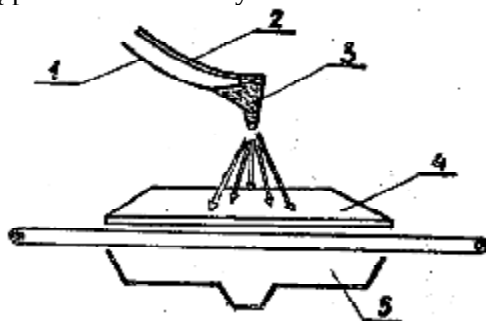


Rys. 5.42. Schemat działania mechanicznego rozpylacza kleju: 1 – dysza doprowadzająca klej, 2 – element obrotowy, 3 – wylot kleju [42]

Rozpylacz elektrostatyczne działają na zasadzie przesyłania ładunków wysokiego napięcia, cząsteczkom rozpylanego kleju. Przy zastosowaniu tych urządzeń, konieczne jest spełnienie wymagań dotyczących właściwości dielektrycznych kleju oraz jego lepkości. Wyróżnia się trzy podstawowe metody rozpylania: elektromechaniczne, elektrostatyczne oraz pneumatyczne.

W przypadku zastosowania rozpylania elektromechanicznego wykorzystuje się różnego typu rozpylacze wirujące, wytwarzające jednocześnie pole jonizujące pomiędzy głowicami rozpylaczy a pokrywanym klejem przedmiotem. Rozpylanie kleju wywołane jest siłami bezwładności powstającymi wskutek ruchu wirowego rozpylaczy. Cząsteczki kleju wylatujące z dyszy rozpylacza są odrzucane siłą odśrodkową na pierścieniowe obudowy ich głowic, skąd odbierają ładunek elektryczny i już jako zjonizowany pył (bez jakichkolwiek strat) osadza się na powierzchni przedmiotu [17, 42].

Nakładanie substancji klejowej w rozpylaczach elektrostatycznych, następuje wyłącznie poprzez oddziaływanie na jego cząstki sił pola elektrostatycznego, które wytworzone zostaje pomiędzy rozpylaczem a pokrywanymi przedmiotami. Do nakładania kleju sposobem rozpylania elektrostatycznego wykorzystuje się nieruchome rozpylacze korytkowe oraz szczelinowe, względem których przemieszczają się pokrywane klejem przedmioty. Podczas tego sposobu nakładania straty kleju są praktycznie wyeliminowane. Rozpylacze szczelinowe zaleca się stosować do natryskiwania klejów na powierzchnie płaskie lub na przedmioty o nieskomplikowanych kształtach. Oprócz klejów ciekłych metodą elektrostatyczną można nakładać także kleje proszkowe. Schemat nanoszenia kleju proszkowego tą metodą przedstawiono na rys. 5.43.



Rys. 5.43. Schemat nanoszenia kleju proszkowego metodą elektrostatyczną: 1 – przewód wysokiego napięcia, 2 – podawanie kleju przy wykorzystaniu wysokiego napięcia, 3 – rozpylacz wykonujący ruch postępowo-zwrotny, 4 – element pokrywany klejem proszkowym, 5 – odpylacze usuwające nadmiar kleju [17]

Rozpylacze pneumatyczne działają na zasadzie wydmuchiwania z dyszy silnie sprężonego powietrza wraz z klejem. W strumieniu tym, bardzo często następuje szybkie rozcieńczenie poszczególnych składników kleju, który szybko ulega zgęstnieniu, staje się lepki i traci swoje właściwości, nie spełniając przy tym wymagań procesu technologicznego. Pomimo tego, że w tej metodzie straty kleju są niewielkie, sposób ten nie jest powszechnie stosowany. Istnieje jeszcze wiele różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do dozowania i nakładania masy klejowej, których opis i zasadę działania przedstawiono w literaturze dotyczącej analizowanego zagadnienia [9, 12, 16, 17, 24, 42, 76, 107].

6. Ustalanie i składanie łączonych elementów

6.1. Kryteria ustalania i łączenia elementów

Proces ustalania i łączenia klejonych elementów jest jednym z ważniejszych etapów konstruowania połączeń klejowych. Warunkiem uzyskania połączeń klejowych o odpowiednio wysokiej jakości jest poprawne ustalenie oraz złożenie łączonych elementów. Zapewnienie odpowiedniej dokładności wymiarowo–kształtowej konstruowanych połączeń klejowych, w znacznym stopniu wpływa na ich wytrzymałość, a tym samym na czas i niezawodność użytkowania. Z uwagi na to, że pomiędzy łączonymi elementami znajduje się ciekła substancja klejąca, istnieje możliwość przemieszczania się ich względem siebie, co może wpływać na otrzymanie niepoprawnie wykonanego połączenia. Ponadto w niektórych przypadkach ze względu na duże wymiary gabarytowe łączonych części, operacja ta może powodować trudności w poprawnym ustaleniu względem siebie łączonych elementów. Poprawne ustalenie klejonych elementów powinno zapewniać nie tylko odpowiednie ułożenie ich względem siebie, ale również jednakową grubość spoiny klejowej (choć w niektórych przypadkach połączeń wymaga się otrzymanie zmiennej grubości spoiny klejowej).

Podczas wykonywania połączeń klejowych w tym etapie, uwzględnia się następujące kryteria, m.in. [12, 24, 30, 44, 60]:

- przygotowanie powierzchni,
- kształt i wielkość łączonych elementów,
- rodzaj łączonych materiałów,
- lokalizację połączenia w konstrukcji,
- dostępność do miejsca położenia,
- rodzaj wykonywanego połączenia,
- rodzaj i właściwości kleju,
- rodzaj produkcji,
- warunki techniczno-technologiczne.

Podstawowym kryterium technologicznym jest takie przygotowanie łączonych elementów, by ich powierzchnie styku przywierały do siebie bez wywierania dużych nacisków. Wszelkie szczeliny, pofalowania, zwichrowania, pęcherze oraz inne defekty likwiduje się za pomocą dodatkowych nacisków, które są często źródłem naprężeń odpowiedzialnych za zmniejszenie wytrzymałości połączeń oraz wytrzymałość całej konstrukcji. Należy także zwrócić uwagę na chropowatość powierzchni, ponieważ w niektórych przypadkach zbyt duże wartości parametrów wysokościowych mogą przyczynić się do niewłaściwego ustalenia klejonych powierzchni.

Ważnym aspektem podczas ustalania i składania połączeń jest kształt łączonych elementów (elementy płaskie, elementy walcowe) oraz rodzaj wykonywanego połączenia (zakładkowe, doczołowe i inne), gdyż determinują one m.in. wybór rodzaju elementów ustalających oraz sposobu ich rozmieszczania itp. Ponadto jest konieczna analiza miejsca położenia połączenia w konstrukcji, gdyż niekiedy jest wymagane zaprojektowanie i wykonanie dodatkowego oprzyrządowania specjalnego.

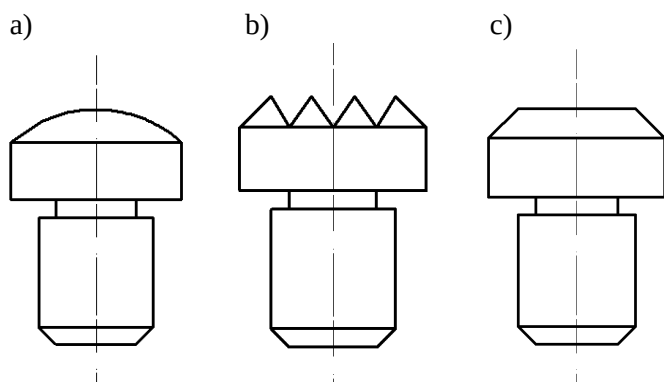
Istotne są także warunki techniczno-technologiczne. Niekiedy do ustalania elementów łączonych wykorzystuje się oprzyrządowanie stosowane w procesach montażu innych połączeń zespołów. Do uzyskania odpowiedniego ustalenia złączonych elementów stosuje się odpowiednie elementy ustalające (np. kołki ustalające, nity, śruby, sworznie, podstawki pryzmowe, ustalacze pryzmowe itp.).

Ustalenie klejonych elementów w określonym położeniu przeprowadza się także za pomocą specjalnych przyrządów. Wyposażone są one w odpowiednie elementy ustalające oraz dociskowe, które zapewniają niezmienność położenia łączonych elementów w trakcie utwardzania spoiny klejowej oraz wytworzenie odpowiedniego nacisku. Ponadto takie przyrządy zapewniają uzyskanie powtarzalności wymiarowej wykonywanych połączeń klejowych.

6.2. Elementy ustalające

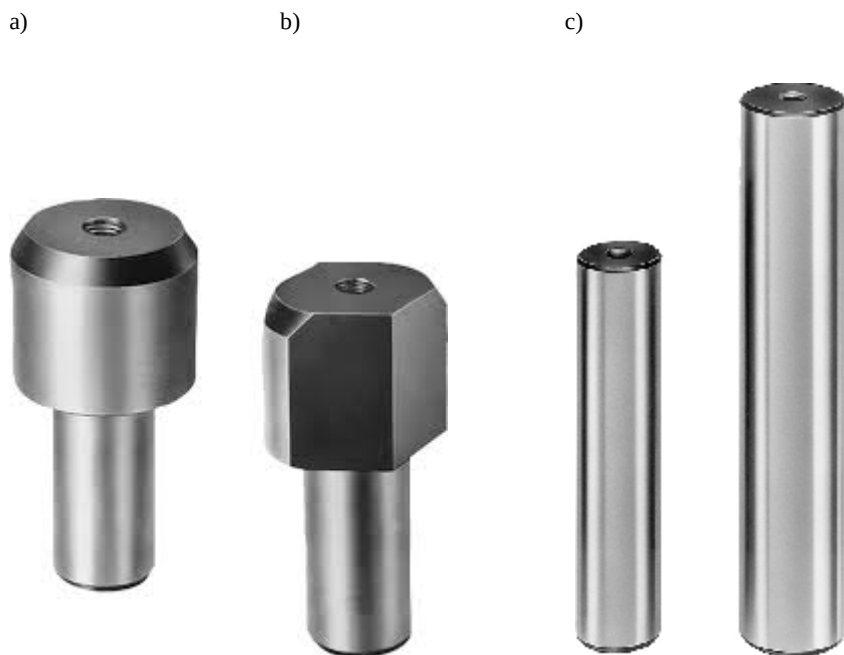
Ustalanie klejonych elementów w urządzeniach klejarskich może być realizowane przy wykorzystaniu typowych elementów ustalających, wśród których wymienia się [17, 23]:

- elementy i zespoły ustalające do ustalania powierzchniami płaskimi (np. kołki ustalające oraz płytki ustalające) – rys. 6.1-6.4,
- elementy i zespoły ustalające do ustalania powierzchni walcowych zewnętrznych (podstawki pryzmowe, elementy z pochyłymi powierzchniami itd.) – rys. 6.5,
- elementy i zespoły ustalające do ustalania powierzchni walcowych wewnętrznych (np. czopy ustalające, kołki ustalające),
- elementy i zespoły ustalające do ustalania powierzchniami walcowymi zewnętrznymi, np.: podstawki pryzmowe, elementy ustalające o pochyłych powierzchniach, uchwyty szczękowe (rys. 6.6),
- elementy i zespoły ustalające do ustalania powierzchniami walcowymi wewnętrznymi, np.: czopy oraz kołki ustalające.

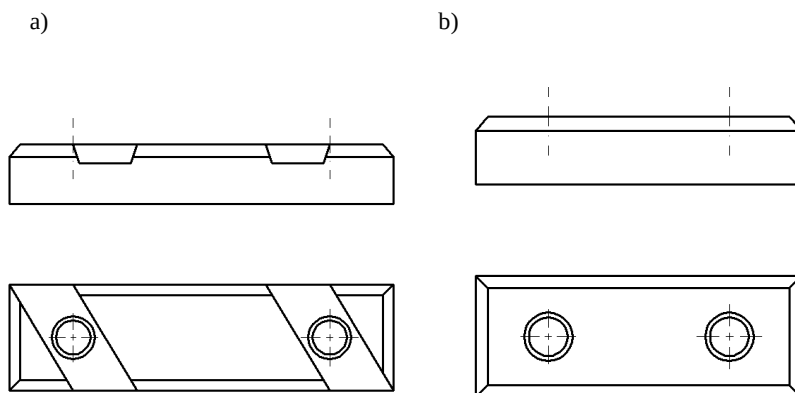


Rys. 6.1. Kolki ustalające: a) z łbem wypukłym, b) z łbem naciętym, c) z łbem płaskim

Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu.

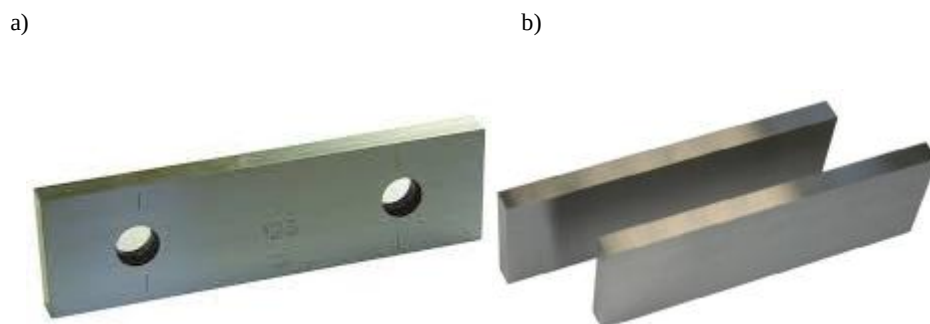


Rys. 6.2. Kolki ustalające: a) z łbem płaskim, b) z łbem płaskim ściętym, c) z łbem płaskim niestopniowane [103]



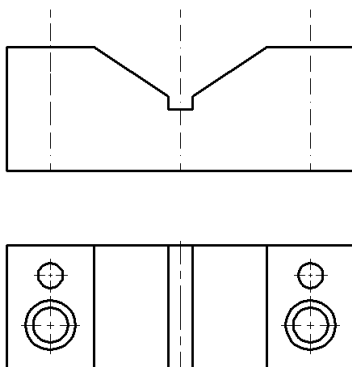
Rys. 6.3. Płytki ustalające: a) rowkowana, b) gładka

Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu



Rys. 6.4. Płytki ustalające: a) z otworami, b) bez otworów [100]

a)



b)



Rys. 6.5. Podstawki pryzmowe: a) schemat, b) podstawka pryzmowa z dociskiem [113]

Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu.



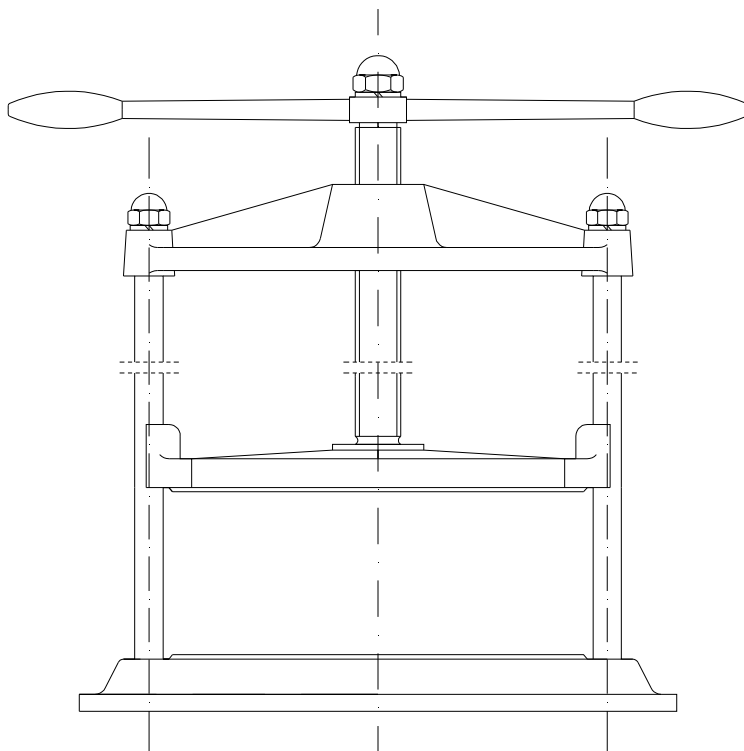
Rys. 6.6. Przykład uchwytu trójszczękowego [100]

Przedstawione elementy ustalające mogą występować zarówno, jako elementy znormalizowane, jak i specjalne, zaprojektowane do konkretnego zastosowania oraz kształtu łączonych elementów.

6.3. Przyrządy do ustalania i składania łączonych elementów

Oprócz zaprezentowanych w podrozdziale 6.2 elementów ustalających do ustalania klejonych elementów często stosuje się oprzyrządowanie specjalne, które dostosowane jest do określonych połączeń. Niekiedy oprócz ustalenia łączonych elementów, stosuje się także mocowanie łączonych elementów lub elementu wykorzystując do tego celu różnego rodzaju przyrządy.

Przykład przyrządu do ustalania i składania elementów połączeń klejowych zaprezentowano na rys. 6.7. Ponadto przyrząd ten jest wykorzystany także do zamocowania połączeń. Przyrząd ten może być zastosowany zarówno do przygotowania połączeń zakładkowych (elementy płaskie), jak i doczołowych tulejowych, przy czym można użyć do tego celu oprzyrządowanie zamieszczone na rys. 6.8.

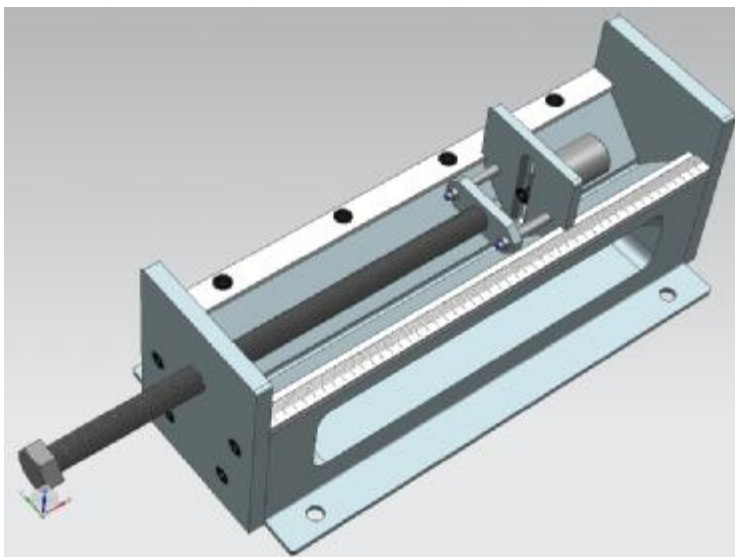


Rys. 6.7. Schemat przyrządu klejarskiego wykorzystanego do ustalania oraz składania połączeń wybranych typów połączeń klejowych [7]



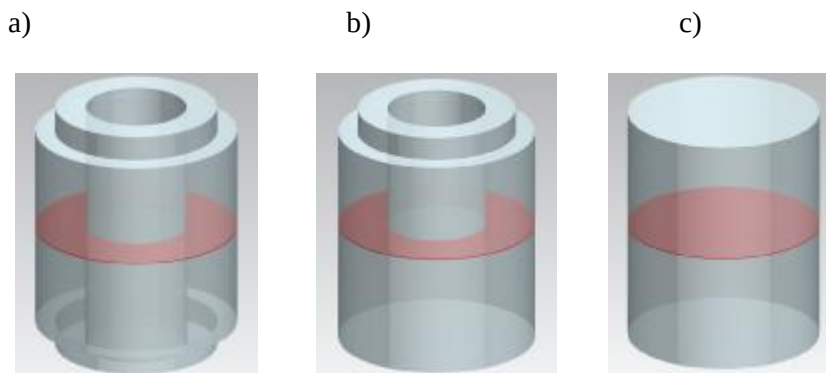
Rys. 6.8. Oprzyrządowanie wykorzystywane do ustalenia i składania połączeń klejowych [7]

Innym przykładem przyrządu do ustalania i składania elementów połączeń klejowych tulejowych zaprezentowano na rys. 6.9.



Rys. 6.9. Przyrząd do ustalania i składania elementów połączeń klejowych tulejowych [39]

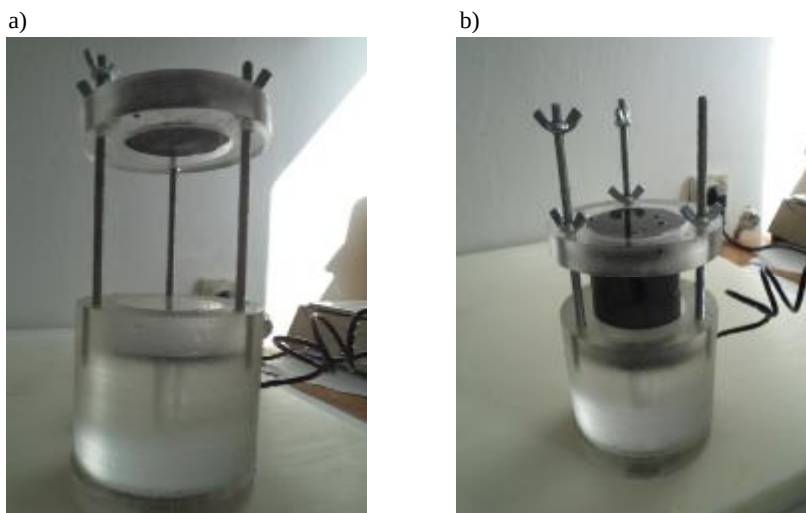
Przyrząd ten umożliwia poprawne ustalenie połączeń klejowych tulejowych sklejonych doczołowo, których przykłady zaprezentowano na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Przykłady połączeń klejowych doczołowych: a) tuleja-tuleja, b) tuleja-walec, c) walec-walec

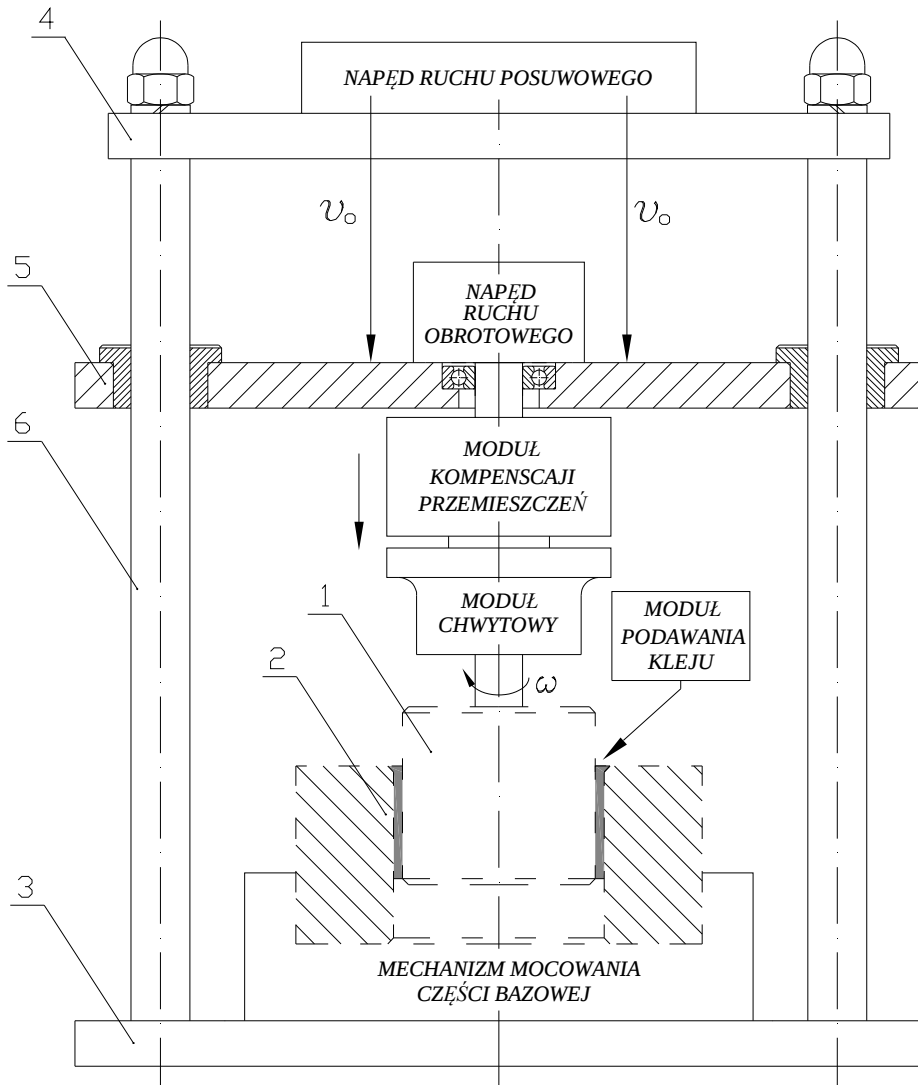
Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu.

Kolejnym uchwytem, który może być wykorzystany do ustalenia elementów połączeń klejowych doczołowych jest przyrząd zaprezentowany na rys. 6.11.



Rys. 6.11. Przykład uchwyty do ustalania połączeń klejowych tulejowych: a) widok uchwyty, b) widok uchwyty z ustalonym i zamocowanym połączeniem klejowym [59]

Przykład stanowiska do składania połączeń współosiowych, zilustrowano na rys. 6.12.



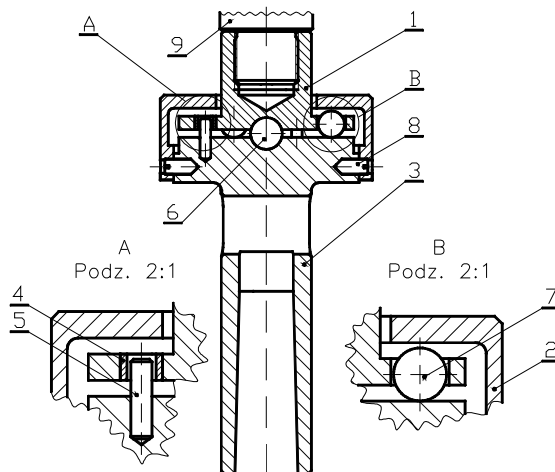
Rys. 6.12. Schemat stanowiska do składania współosiowych połączeń klejowych: 1 – element wstawiany, 2 – element bazowy, 3 – płyta podstawy, 4 – płyta górna, 5 – płyta ruchoma, 6 – kolumna prowadząca [8]

Powyższe stanowisko (rys. 6.12) zostało zaprojektowane w formie czterokolumnowej prasy hydraulicznej. Szczegółowe założenia oraz obliczenia konstrukcyjne przedstawiono w pracy [8]. Do jego podstawowych elementów składowych należą:

- napęd ruchu obrotowego,
- napęd ruchu posuwowego,
- mechanizm mocowania części bazowej,
- moduł chwytowy,
- moduł podawania kleju,
- moduł kompensacji przemieszczeń elementu przyłączanego.

Ruch śrubowy części wstawianej 1 realizowany jest poprzez dwa niezależne napędy. Napęd ruchu posuwowego stanowi siłownik hydrauliczny dwustronnego działania. Powoduje on pionowe przemieszczenie płyty ruchomej 5 wraz ze znajdującym się na niej silnikiem elektrycznym krokowym. Silnik ten przenosi ruch obrotowy na element wstawiany i charakteryzuje się płynną pracą oraz niezmienną wartością mocy w całym zakresie regulowanej prędkości obrotowej.

W celu uzyskania wymaganych warunków współosiowości składanych elementów, a także kompensacji odchyłek promieniowych oraz kątowych osi elementu wstawianego, w stosunku do osi elementu bazowego, powstających podczas składania połączenia, przyrząd dodatkowo wyposażono w moduł kompensacji przemieszczeń promieniowych oraz kątowych w postaci specjalnie zaprojektowanej oprawki wahliwej (rys. 6.13).



Rys. 6.13. Uchwyt wahliwy do kompensacji błędów współosiowości składanych elementów: 1 – łącznik, 2 – obudowa, 3 – gniazdo (chwyt) ze stożkiem Morse’a, 4 – tuleja redukcyjna, 5 – kołek walcowy, 6,7 – kulki, 8 – wkręt dociskowy, 9 – wał przekładni kątowej [8]

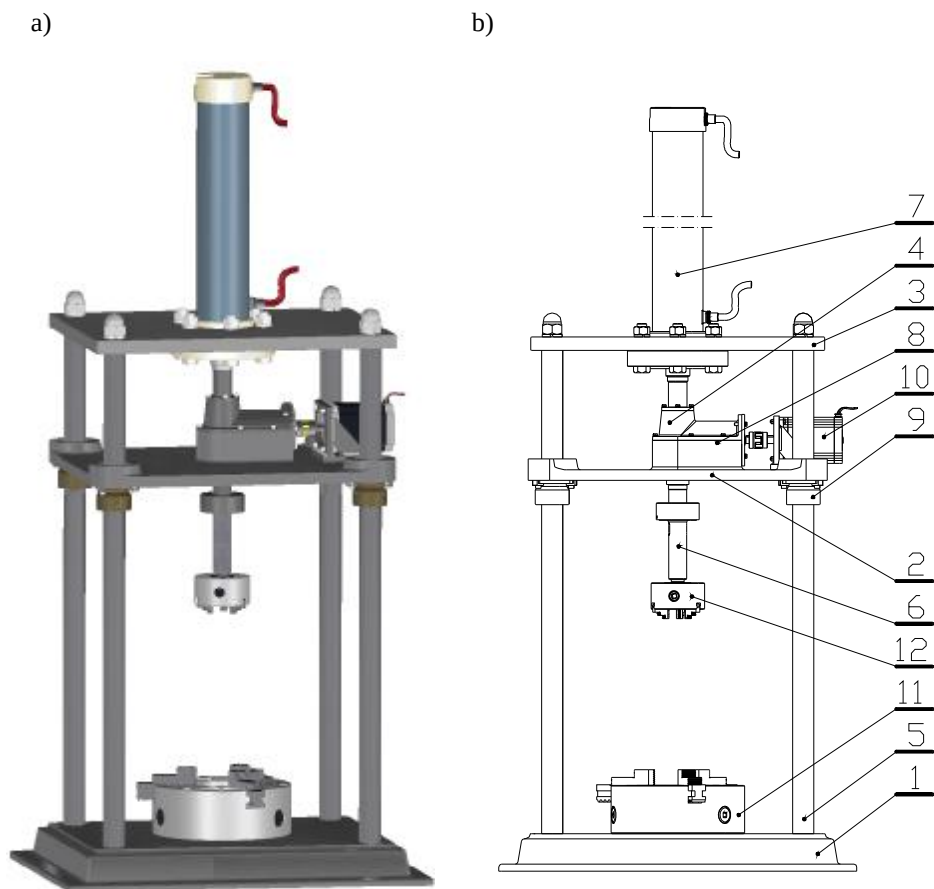
Połączenie uchwytu wahliwego z wałem przekładni kątowej 9 realizowane jest przy pomocy gwintowanego łącznika 1. Łącznik ten, dzięki kulce 6 osadzonej w jego dolnej części, zapewnia wychylenie uchwytu od osi pionowej o kąt nieprzekraczający 3° . Moment skręcający przenoszony jest z łącznika 1 na chwyt z gniazdem Morse'a 3 za pomocą trzech kołków walcowych 5 rozmieszczonych promieniowo na jego górnej powierzchni co 120° . Zadaniem wymiennej tulei redukcyjnej 4 jest między innymi ustalanie maksymalnego kątowego wychylenia uchwytu Morse'a od osi pionowej. Odpowiednio dobierając wymiar średnicy wewnętrznej tulei 4, uzyskuje się mniejszą lub większą wartość luzu pomiędzy tuleją a kołkiem walcowym 5, co w efekcie wpływa na zmniejszenie, bądź zwiększenie maksymalnego kąta wychylenia chwytu Morse'a. Całość konstrukcji połączona jest ze sobą za pomocą obudowy 2 oraz dwóch wkrętów dociskowych 8. Zadaniem kulek 7 rozmieszczonych promieniowo na górnej powierzchni chwytu Morse'a (3 szt. $\times 120^\circ$) jest zminimalizowanie tarcia pomiędzy obudową uchwytu a kołnierzem łącznika w chwili, kiedy oprawka nie jest obciążona siłami osiowymi oraz momentem skręcającym.

Istotnym elementem budowy przedstawionego uchwytu jest znormalizowane gniazdo Morse'a. Służy ono do bezpośredniego ustalania oraz mocowania zespołów mocujących poszczególne elementy połączenia klejowego. Umożliwia także szybką ich wymianę w zależności od potrzeb, tj. kształtu oraz wymiarów składanego połączenia.

Mocowanie na stanowisku poszczególnych elementów połączenia współośiowego, odbywa się przy wykorzystaniu różnego typu znormalizowanych elementów i zespołów mocujących. Ich rodzaj oraz wymiary dobiera się w zależności od kształtu, wymiarów i sposobu ustalania elementu wstawianego 1 oraz elementu bazowego 2.

Moduł podawania kleju stanowi czasowy dozownik kleju ustawiany opcjonalnie na pozycji montażowej.

Zaprojektowany przyrząd klejarski do składania połączeń klejowych współośiowych przedstawiono na rys. 6.14.



Rys. 6.14. Stanowisko klejarские do składania połączeń współosiowych: a) widok izometryczny 3D, b) widok 2D; 1 – płyta podstawy, 2 – płyta ruchoma, 3 – płyta górna, 4 – pokrywa, 5 – kolumna, 6 – uchwyt wahliwy, 7 – siłownik hydrauliczny, 8 – przekładnia kątowna, 9 – tuleja ślizgowa, 10 – silnik krokowy, 11 – uchwyt trójszczękowy spiralny, 12 – uchwyt trójszczękowy ze stożkiem Morse’a [8]

Przyrząd (przedstawiony na rys. 6.14) zaprojektowany został w oparciu o kolumnową konstrukcję żeliwno – stalową, gdzie główne elementy składowe stanowiska, tj. płyta podstawy 1, płyta ruchoma 2 oraz pokrywa płyty 4 wykonane zostały, jako odlewy żeliwne, natomiast kolumny prowadzące 5 oraz płyta górna 3 stanowią elementy stalowe ze stali konstrukcyjnej. W celu umożliwienia składania współosiowych połączeń klejowych o zróżnicowanych kształtach oraz wymiarach, stanowisko charakteryzuje się dużą powierzchnią płyty podstawy (550mm x 450mm) oraz możliwością składania próbek połączeń klejowych o maksymalnej łącznej wysokości $h_{\max}=400$ mm.

Przyrząd jest wyposażony w dwa niezależnie działające napędy ruchu elementu wstawianego. Ruch posuwowy realizowany jest przy wykorzystaniu siłownika hydraulicznego dwustronnego działania 7 montowanego kołnierзовo do płyty górnej 3. Siłownik ten oddziałuje na płytę ruchomą 2, która porusza się w kierunku pionowym wzdłuż kolumn prowadzących 5. Dokładne prowadzenie płyty ruchomej wzdłuż kolumn gwarantują osadzone w niej tuleje.

Ruch obrotowy części wstawianej połączenia klejowego, uzyskiwany jest poprzez przekładnię kątową 8 o przełożeniu 1:1. Przekładnia ta uzyskuje napęd od silnika krokowego 10, którego maksymalny moment trzymający wynosi $M=8500 \text{ Nmm}$, natomiast maksymalna prędkość obrotowa $n=200 \text{ obr/s}$. Zastosowanie tego rodzaju napędu przekładni kątowej, umożliwia precyzyjną regulację prędkości obrotowej wału przekładni, sprzyja uzyskiwaniu tych samych mocy zarówno przy niskich, jak i wysokich obrotach silnika, a także pozwala na szybką zmianę kierunku obrotów wału.

Moduł kompensacji przemieszczeń 6 ma na celu między innymi eliminację ewentualnych błędów wzajemnego położenia elementów składanego połączenia klejowego.

W operacji składania połączeń klejowych szczególną uwagę zwraca się również na wartość nacisku wywieranego na klejone materiały. Nacisk sprzyja procesowi zwilżania powierzchni oraz ułatwia rozprowadzanie kleju na powierzchni łączonych materiałów. Dobór określonej wartości ciśnienia, uzależniony jest między innymi od grubości materiałów podlegających łączeniu, sposobu przygotowania ich powierzchni do klejenia, a także typowych parametrów fizycznych mieszanki klejowej (gęstości, lepkości, skurczu termicznego i chemicznego). Zaleca się, aby nacisk podczas składania połączeń klejowych był możliwie najmniejszy, jednakże powinien zapewniać dokładne przyleganie łączonych powierzchni. Klasyfikację typowych przyrządów do wywierania nacisku wykorzystywanych w operacji składania połączeń klejowych, a także ich najczęstsze zastosowania przedstawiono w rozdziale 7.

7. Utwardzanie spoiny klejowej

7.1. Czynniki wpływające na proces utwardzania

Kolejnym etapem w procesie technologicznym klejenia po etapie ustalania i łączenia klejonych elementów jest etap utwardzania spoiny klejowej. W procesie utwardzania najistotniejszymi parametrami wpływającymi na realizację tego procesu są [12, 42]:

- nacisk (ciśnienie utwardzania),
- temperatura utwardzania,
- czas utwardzania.

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 sklejanых materiałów i sposobu przygotowania ich powierzchni do klejenia.

Ciśnienie w procesie klejenia sprzyja procesowi zwilżania, zwłaszcza przy wypełnianiu mikroporów i mikronierówności powierzchni. Ułatwia rozprowadzanie kleju oraz jednoznaczne ustalanie łączonych elementów. Nacisk powinien zapewnić 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 [17].

Czynnikiem głównie decydującym o wartości nacisków klejenia jest skurcz utwardzenia kleju. Jeśli jest on mały (rzędu części procenta) to naciski są małe i nie przekraczają 0,1 MPa (tzw. naciski kontaktowe), natomiast gdy jest on rzędu kilku procent to wartość nacisków mieści się w przedziale od 0,5 MPa do 2,0 MPa [24].

Wśród urządzeń stosowanych w procesie utwardzania wymienia się m.in. urządzenia do wywierania ciśnienia oraz urządzenia grzejne. Część urządzeń grzejnym stosowanych podczas dodatkowych operacji zamieszczono w rozdziale 9.

7.2. Urządzenia stosowane w procesie utwardzania

Nacisk, wywierany na klejone elementy podczas utwardzania spoiny klejowej, realizowany może być różnymi metodami. Wśród typowych urządzeń do wytwarzania ciśnienia, na szczególną uwagę zasługują przyrządy wykorzystujące, m.in. [16, 24, 42, 58]:

- mechanizmy dźwigniowe,
- mechanizmy sprężynowe,
- mechanizmy hydrauliczne,
- urządzenia próżniowe,

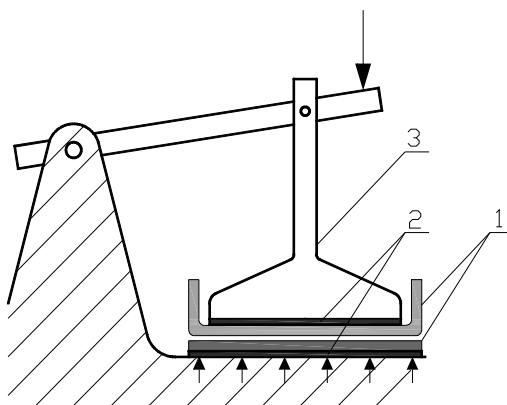
- komory ciśnieniowe,
- docisk magnetyczny.

Przyrządy te, pomimo swojej odmiennej budowy i przeznaczenia, powinny spełniać określone wymagania. Do podstawowych zalicza się przede wszystkim:

- 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.

Pośród powyższych kryteriów funkcjonalności, szczególne znaczenie odgrywa możliwość precyzyjnego doboru ciśnienia wywieranego przez stanowisko, na klejone elementy. Ciśnienie to, powinno być tak dobrane, aby zapewnić dokładne przyleganie do siebie powierzchni łączonych materiałów, nie powodując przy tym deformacji konstrukcji. Zastosowanie ciśnienia o zbyt dużej wartości, wpływa na powstanie bezpośredniego styku pomiędzy łączonymi materiałami, co może być przyczyną usunięcia kleju znajdującego się między łączonymi elementami [16]. Natomiast nacisk zbyt mały powoduje powstanie spoiny grubej i porowatej, często o nierównomiernej grubości. Wymienione nieprawidłowości przyczyniają się do zmniejszenia wytrzymałości połączeń klejowych.

Urządzenia z dociskiem dźwigniowym wykorzystywane są głównie w przypadku łączenia elementów, w których konieczne jest zróżnicowanie wartości nacisków wywieranych na poszczególne miejsca na powierzchni dociskanych materiałów. Schemat przyrządu z dociskiem dźwigniowym przedstawiono na rys. 7.1.

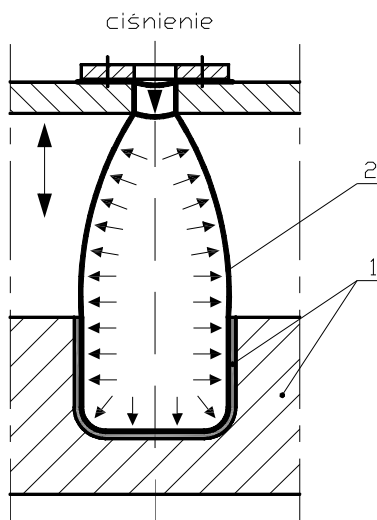


Rys. 7.1. Schemat przyrządu do wywierania ciśnienia wykorzystującego mechanizm dźwigniowy: 1 – elementy klejone, 2 – podkładki gumowe, 3 – element dociskający

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [24]

Istotną rolę w tych przyrządach odgrywają elementy metalowe oraz gumowe. Elementy metalowe służą do zabezpieczenia przed zgnieceniem w miejscu przejścia w elementy mniej sztywne. Elementy gumowe przyczyniają się do zapewnienia równomiernego nacisku na całą klejonej powierzchni, kompensując jednocześnie zmiany nacisków na łączonych powierzchniach, wynikające z błędów wykonania elementów dociskowych oraz poszczególnych elementów klejonego podzespołu [42, 58].

W urządzeniach z dociskiem przeponowym wykorzystuje się nacisk wywierany na klejone powierzchnie, poprzez elastyczną przeponę. Przepony wykonane są zazwyczaj z gumy charakteryzującej się znaczną odpornością cieplną. W celu zwiększenia szczelności układu, dodatkowo oklejone są one jedno- lub dwustronnie tkaniną balonową (rys. 7.2).



Rys. 7.2. Schemat przyrządu z dociskiem przeponowym: 1 – materiały łączone, 2 – gumowa przepona

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [24]

Docisk przepony do klejonych elementów uzyskuje się przy wykorzystaniu sprężonego powietrza, które tłoczone jest poprzez instalację pneumatyczną. W efekcie tego otrzymywać można połączenia klejowe pomiędzy materiałami o złożonych profilach powierzchni (okrągłych, falistych itp.), często niemożliwych do łączenia przy wykorzystaniu docisków mechanicznych. Pewną odmianę przyrządów wykorzystujących docisk przeponowy stanowią autoklawy (rys. 7.3).

a)

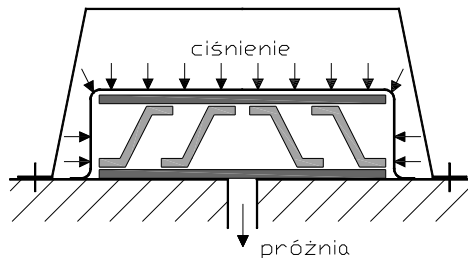


b)



Rys. 7.3. Widok autoklawu: a) widok wnętrza, b) widok zewnętrzny [126]

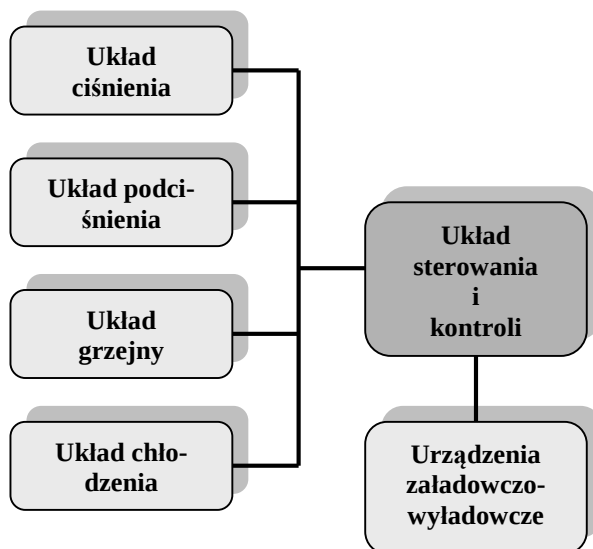
W tego typu urządzeniach, docisk realizowany jest poprzez elastyczną przeponę w wyniku różnicy ciśnień. Uproszczony schemat budowy autoklawu przedstawiono na rys. 7.4.



Rys. 7.4. Schemat autoklawu do wytwarzania nacisku na połączenia klejowe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [24]

W trakcie procesu składania połączeń klejowych, poszczególne elementy podlegające łączeniu, znajdują się w szczelnych, elastycznych workach. Zadaniem instalacji próżniowej autoklawu, jest wytworzenie podciśnienia panującego w strefie ograniczonej poprzez elastyczne worki, natomiast układ ciśnieniowy służy do napełniania zbiornika gazem o odpowiednim ciśnieniu, a także zapewnienia jego stałej wartości w trakcie przebiegu procesu klejenia.



Rys. 7.5. Ogólny schemat najważniejszych zespołów wchodzących w skład budowy autoklawu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [58]

Do najważniejszych zespołów autoklawów można zaliczyć (rys. 7.5) [42, 58]:

- układ ciśnienia,
- układ podciśnienia,
- układ grzejny ze sterowaniem i regulacją temperatury,
- układ chłodzenia (zabezpieczający płaszcz przed przegrzaniem),
- układ sterowania i kontroli,
- wyposażenie załadowczo-wyładowcze.

Układ ciśnienia składa się ze zbiornika ciśnieniowego zapewniającego wymagane ciśnienie i temperaturę. Zbiornik autoklawu napełniony jest powietrzem lub azotem z baterii butli podłączonych do wspólnego kolektora. Napełnianie zbiornika i utrzymywanie niezbędnego ciśnienia podczas procesu jest kontrolowane manometrem i rejestratorem ciśnienia. Układ wyposażony jest w zawór bezpieczeństwa i zawór spustowy.

Układ podciśnienia składa się z pompy próżniowej połączonej z zaworem rozdzielającym, pozwalającym na odsysanie dwóch niezależnych przewodów podciśnieniowych oraz wakuometrów podłączonych do przewodów ssących.

Układ grzejny jest układem elektrycznym, w którym element elektrooporowy jest nawinięty po zewnętrznej stronie zbiornika. Układ grzejny autoklawu jest podzielony na trzy strefy grzejne. Temperaturę wsadu na całej długości zbiornika kontrolują termopary.

Układ chłodzenia składa się z chłodnicy wodnej w kształcie walca z rurek rozmieszczonych wzdłuż tworzących zbiornika. Układ zabezpiecza przed przegrzaniem oraz umożliwia skrócenie czasu chłodzenia wsadu z temperatury klejenia do temperatury otoczenia. Autoklaw może pracować w cyklu automatycznym.

Układ sterowania i kontroli obejmuje ogrzewanie, ciśnienie, chłodzenie oraz inne parametry pracy autoklawu. Wymienione parametry są badane, rejestrowane i sterowane w układzie sprzężenia zwrotnego. Układ może być sterowany zarówno ręcznie, jak i automatycznie. Wyposażony jest w instalacje alarmowe, system blokad zabezpieczający przed uszkodzeniem innych elementów w sytuacji, gdy uszkodzeniu ulega jeden z nich.

Układ załadowczo-wyładowczy umożliwia transport, załadunek oraz odpowiednie rozmieszczenie w autoklawie klejonych elementów. Do wyposażenia urządzeń załadowczo-wyładowczych można zaliczyć m.in. wózki jazdy poprzecznej oraz wózki jazdy wzdłużnej.

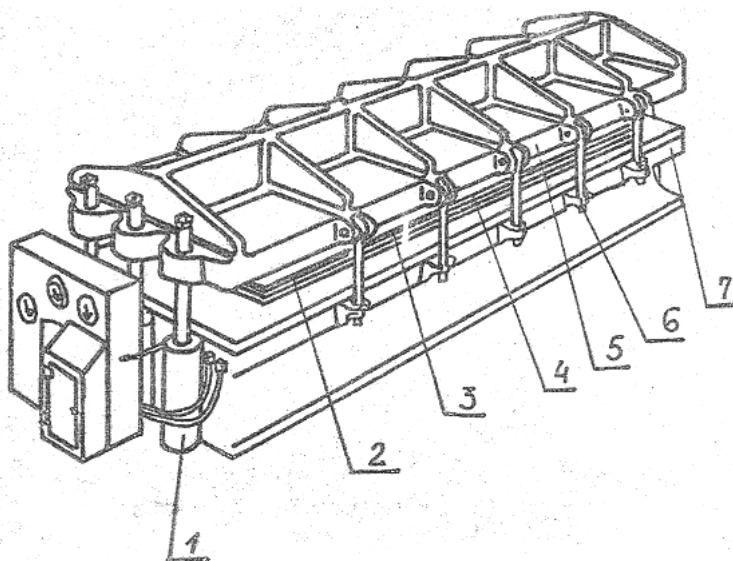
W przypadku klejenia dużych powierzchni zasadne jest stosowanie urządzeń z dociskiem magnetycznym. Klejone elementy znajdują się pomiędzy dwiema płytami (dolną oraz górną), natomiast nacisk wywierany jest na skutek wzajemnego przyciągania się płyty dolnej oraz magnesu umieszczonego na płycie gór-

nej. Wadą tych urządzeń jest ograniczony okres użytkowania magnesu, spowodowany rozmagnesowywaniem się w podwyższonej temperaturze.

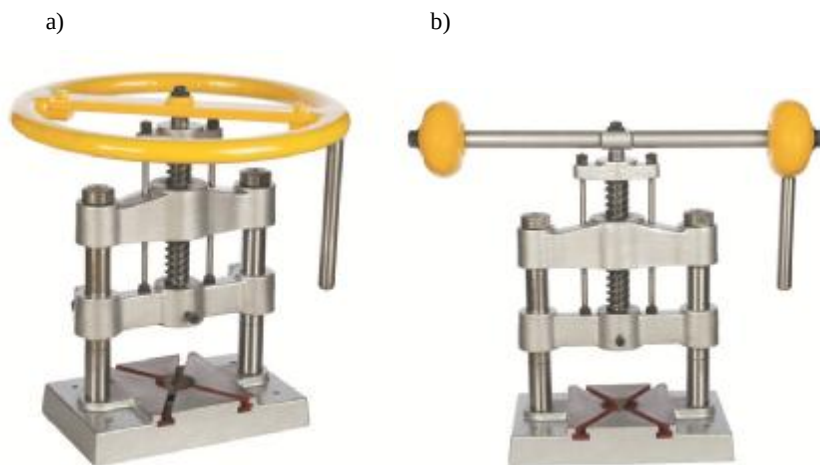
Oprócz wyżej wymienionych urządzeń do wywierania ciśnienia, ważną rolę w procesie składania połączeń klejowych, odgrywają różnego rodzaju prasy hydrauliczne, śrubowe i pneumatyczne (rys. 7.6, rys. 7.7, rys. 7.8). Prasy posiadające dużą powierzchnię płyty podstawy, umożliwiają jednorazowe wykonywanie dużej liczby połączeń klejowych, bądź klejenie dużych powierzchni. Oprócz tego można stosować klejenie jednocześnie w kilku sekcjach prasy, na przykład w kilku pionowo rozmieszczonych sekcjach (rys. 7.8).



Rys. 7.6. Przykład pras: a) hydraulicznej [95], b) hydrauliczno-pneumatycznej [112]

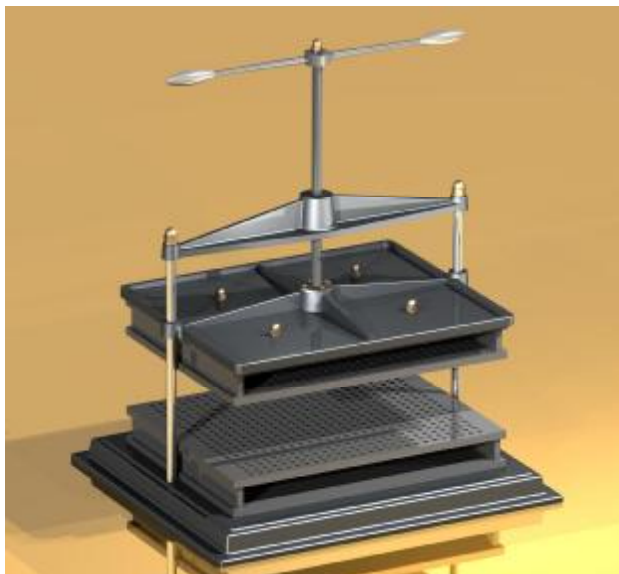


Rys. 7.7. Przykład prasy hydraulicznej: 1 – cylindry hydrauliczne, 2 – przekładka, 3 – przepona z blachy nierdzewnej, 4 – klejony zespół, 5 – przekładka, 6 – śruby ściągające, 7 – płyta ogrzewana parą [42]



Rys. 7.8. Przykład pras ręcznych śrubowych: a) z uchwytem kołowym, b) balansowa [123]

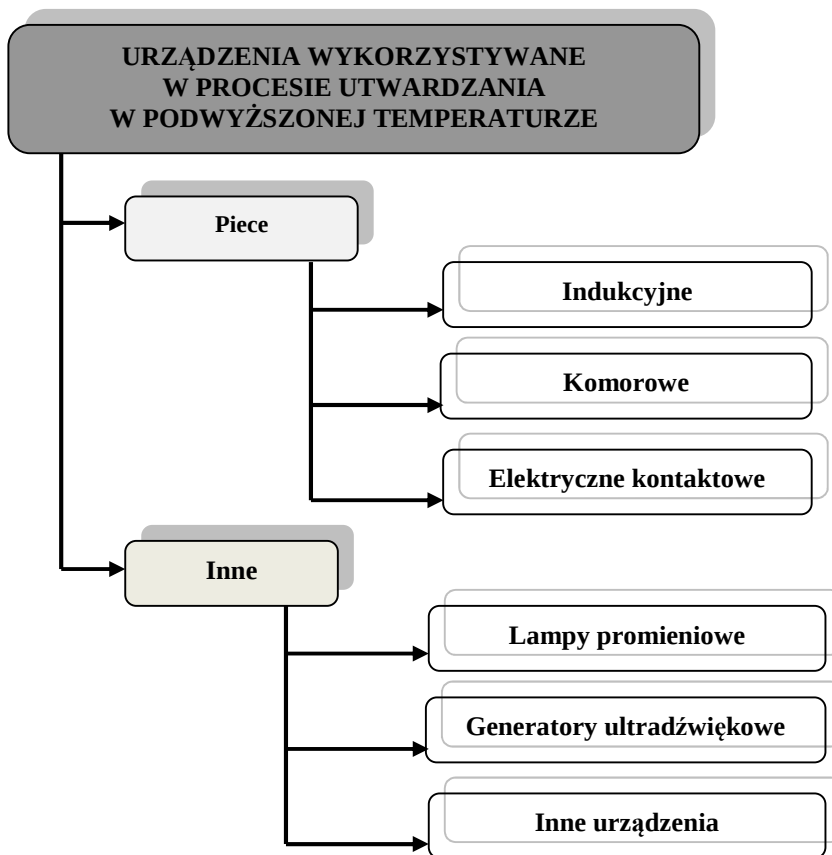
Na rys. 7.9 przedstawiono ręczną prasę śrubową do wywierania nacisku na połączenia klejowe podczas utwardzania spoiny [7].



Rys. 7.9. Przykład prasy śrubowej do wywierania ciśnienia na połączenia klejowe [7]

Przyrząd ten składa się z dwóch płyt dociskowych – górnej i dolnej, pomiędzy którymi umieszczone są płyty podstawy uniwersalnych przyrządów składanych (UPS). Umożliwiają one między innymi zamocowanie na nich różnego rodzaju elementów ustalających oraz zamocowujących połączenia klejowe, tj.: podstawek pryzmowych, kołków ustalających, łap dociskowych itp. Ciśnienie wywierane jest w wyniku docisku płyty górnej UPS do uprzednio zamocowanych na płycie dolnej, próbek połączeń klejowych.

W operacji utwardzania na gorąco istotne jest zapewnienie odpowiedniej temperatury procesu utwardzania. Zależnie od wymagań i możliwości produkcyjnych, rodzaju produkcji, kształtu połączenia, umiejscowienia połączenia w konstrukcji, istnieje wiele rozwiązań elementów oraz urządzeń grzejnych. Przykładowe rodzaje tego typu urządzeń przedstawiono na schemacie na rys. 7.10.



Rys. 7.10. Przykładowe urządzenia stosowane podczas utwardzania spoiny klejowej w podwyższonej temperaturze

Źródło: Opracowanie własne

O wyborze konkretnej metody utwardzania oraz stosowanego w tym celu oprzyrządowania, oprócz czynników technologicznych, decydują również właściwości otrzymanych spoin. Dlatego też wybór sposobu utwardzania w dużej mierze wpływa na jakość otrzymanego połączenia, tzn. jego wytrzymałość, niezawodność, czas użytkowania, itp.

8. Kontrola połączeń klejowych

8.1. Metody kontroli połączeń klejowych

Kontrola połączeń klejowych pozwala na określenie poprawności wykonania połączeń klejowych, a także pośrednio na ocenę poprawności przyjętych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych całej technologii klejenia.

Kontrola połączeń klejowych ma na celu m.in. [12, 24, 42]:

- sprawdzenie poprawności wymiarowo-kształtowej wykonanych połączeń,
- wykrywanie i lokalizację ewentualnych wad wewnętrznych oraz nieciągłości powstałych w spoinie klejowej,
- określenie wytrzymałości połączeń klejowych,
- określenie odporności na działanie warunków zewnętrznych.

Stosowane obecnie urządzenia do kontroli jakości połączeń, działają przy wykorzystaniu różnego rodzaju zjawisk fizycznych. Do podstawowych metod badania jakości konstruowanych połączeń klejowych zalicza się [11, 14, 15, 16, 32, 33, 38, 53, 55, 56]:

- badania wizualne,
- badania ultradźwiękowe,
- badania penetracyjne,
- badania oparte na pomiarze siły przenikającego pola magnetycznego,
- metody termograficzne,
- pomiary drgań własnych,
- badania radiologiczne,
- metody badań oparte na holografii laserowej,
- badania metodą prądów wirowych,
- metody prześwietleniowe,
- metody akustyczne,
- inne.

Wybór określonej metody badania zdeterminowany jest przede wszystkim [17, 19, 42, 66, 67]:

- rodzajem i grubością łączonych materiałów,
- różnorodnością klejonych materiałów,
- ukształtowaniem połączenia,
- lokalizacją połączenia w konstrukcji, a zwłaszcza dostępnością montażową,
- charakterystyką konstrukcyjną badanego wyrobu,
- kosztami operacji,
- rodzajem produkcji,
- dysponowanym wyposażeniem badawczym,
- warunkami badawczymi,

- wymaganiami dotyczącymi konieczności pozostawienia połączenia w formie niezniszczonej,
- wymaganym współczynnikiem bezpieczeństwa konstrukcji,
- stopniem odpowiedzialności konstrukcji klejonej,
- inne czynniki.

Przedstawione czynniki wpływają także na wybór metod kwalifikowanych do badań nieniszczących lub/oraz niszczących [19, 42, 66, 78]. W przypadku badań nieniszczących wykonane połączenia klejowe oraz łączone materiały nie ulegają zniszczeniu. Po kontroli z zastosowaniem metod badań nieniszczących takie połączenia klejowe lub konstrukcje sklepane mogą zostać przekazane do eksploatacji. W przypadku wykorzystania badań niszczących połączenia klejowe ulegają zniszczeniu. W tym celu wykonuje się najczęściej partie próbne w danej serii i podaje się kontroli niszczącej. Wśród metod niszczących można wyróżnić różnorodne badania wytrzymałościowe (statyczne i dynamiczne, krótkotrwałe i długotrwałe, zmęczeniowe, stosujące różne rodzaje obciążeń), a także badania starzeniowe.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono rodzaje oraz zasadę działania wybranych urządzeń do kontroli jakości połączeń klejowych.

8.2. Urządzenia stosowane podczas kontroli połączeń klejowych

8.2.1. Metoda wizualna

Metoda wizualna jest jedną z metod kontroli nieniszczącej (NDT- *non-destructive method*). Badania wizualne definiowane są jako proces obserwacji, która prowadzona jest okiem nieuzbrojonym (w sposób bezpośredni) lub wykorzystywane jest specjalne wyposażenie (sposób pośredni) [33]. Celem tego procesu jest sprawdzenie zgodności danego obiektu badań z wymaganiami zawartymi m.in. w normach, warunkach odbioru i innych przepisach.

Metoda wizualna uznawana jest za podstawową metodę badawczą. Najczęściej stosowana jest z innymi metodami badań nieniszczących. Metoda wizualna stanowi pierwszy, podstawowy etap kontroli polegający na sprawdzeniu występowania niezgodności możliwych do zaobserwowania okiem nieuzbrojonym (badania wizualne bezpośrednie) lub z wykorzystaniem odpowiednich przyrządów (badania wizualne zdalne), najczęściej optycznych, a także często zmierzeniu ich charakterystycznych wymiarów.

Podczas przeprowadzania badań konieczne jest spełnienie podstawowych wymagań związanych z poprawnością przeprowadzania oględzin, takich jak: konieczność posiadania odpowiednich kwalifikacji, dobry wzrok badającego, dostateczne natężenie światła (500 lux), a także nie bez znaczenia jest umiejętność wyróżnienia i interpretacji niezgodności [33, 45].

Wykonując badanie wizualne pamiętać należy także o tym, aby przeprowadzać go w warunkach właściwego oświetlenia oraz w odpowiedniej odległości

od badanej powierzchni. Odległość między okiem badającego a powierzchnią badaną powinna mieścić się w granicach do 600 mm, przy kącie widzenia nie mniejszym niż ok. 30° [33].

Wśród wyposażenia, stosowanego podczas badań wizualnych, można wyróżnić: różnego rodzaju lupy, mikroskopy, lusterka i zestawy usterkowe (rys. 8.1), endoskopy (boroskopy – rys. 8.2 i fiberoskopy), videoskopy (rys. 8.3), videoanalizatory, różnorodne oświetlacze i inne.



Rys. 8.1. Szkło powiększające z lampką [115]



Rys. 8.2. Przykład boroskopu z kamerą 17mm LCD 3,2 [115]



Rys. 8.3. Przykład videoskopu [119]

Wybór wyposażenia do badań wizualnych wraz z jego rodzajem, parametrami, czy też zakresu wyposażenia dodatkowego uzależniony jest od wielu czynników, do których można zaliczyć m.in.: rodzaj badanych obiektów, ich kształtu, wymiarów i położenia w konstrukcji, a także warunków przeprowadzania pomiarów.

8.2.2. Metoda penetracyjna

Metoda penetracyjna wykorzystuje zjawisko włoskowatości. Wszelkiego rodzaju zewnętrzne wady szczelinowe zachowują się jak kapilary, w które wnika ciecz zwana penetrantem. Metoda ta umożliwia szybką ocenę dużych powierzchni na obecność nieciągłości powierzchniowych. Do badań penetracyjnych stosuje się gotowe zestawy preparatów, zgodnie ze stosownymi normami, przy czym preparaty mogą być barwne lub fluorescencyjne [42, 89, 114].

Ze względu na rodzaj użytej cieczy penetracyjnej stosowane są trzy techniki badania:

- barwna,
- fluorescencyjna,
- barwno – fluorescencyjna.

Preparaty do badań penetracyjnych powinny być wzajemnie zgodne tzn. nie używa się np. penetrantu fluorescencyjnego z wywoływaczem przeznaczonym do penetranta barwnego [42, 114].

8.2.3. Metoda ultradźwiękowa

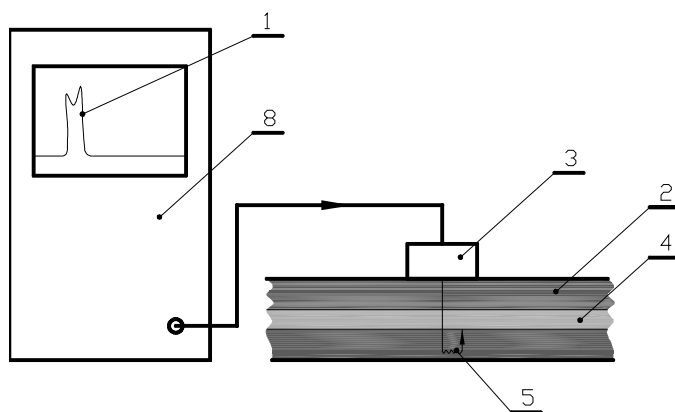
Badania ultradźwiękowe należą do jednych z najważniejszych i najbardziej rozpowszechnionych metod badań nieniszczących. Badania ultradźwiękowe są oparte na zjawisku rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w ciałach stałych. Fale ultradźwiękowe powstają wskutek drgań przetwornika (płytki piezoelektrycznej), po doprowadzeniu do jego powierzchni prądu o wielkiej częstotliwości (przeważnie od 0,5 do 15 MHz). Fale ultradźwiękowe uzyskuje się za pomocą odpowiedniej aparatury, tj. zestawu złożonego z defektoskopu ultradźwiękowego oraz z głowicy [38, 45, 66].

Fale ultradźwiękowe wprowadza się do badanego przedmiotu przez głowicę i odpowiedni płyn (np. olej, wodę, roztwór kleju do tapet), tworzący sprzężenie akustyczne. Odbicia wiązki fal ultradźwiękowych od powierzchni przedmiotu lub od wewnętrznych nieciągłości materiału są uwidaczniane na ekranie defektoskopu w postaci tzw. "echa dna, lub echa wady". Znając geometrię badanego elementu oraz charakterystykę głowicy, można na podstawie odległości impulsu "echa wady" ustalić położenie "wady" w rzeczywistości [38, 66].

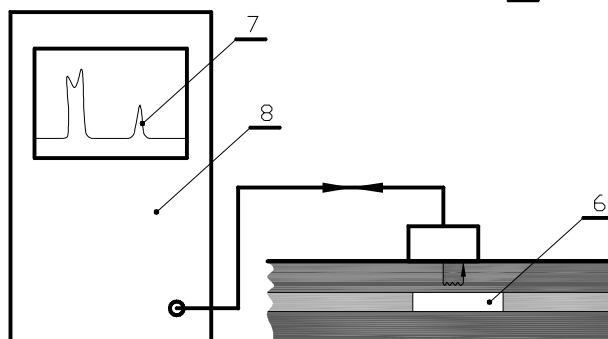
Zasada działania defektoskopów ultradźwiękowych (rys. 8.4) polega na wykrywaniu i rejestracji wahań amplitudy sygnału akustycznego absorbowanego przez materiał klejony. Badanie przeprowadza się przy wykorzystaniu specjalnej sondy nadawczo-odbiorczej 3, która przesuwana jest po powierzchni badanego materiału 2 i emituje sygnał akustyczny wysokiej częstotliwości 1. W zależności od jakości wykonywanego połączenia, tj. częstości występowania niedoklejeń 6, na ekranie miernika – oscyloskopu 8 obserwuje się zmiany wartości odbitego sygnału 7. W przypadku, gdy skanowana spoina pozbawiona jest wad wewnętrznych i niedoklejeń, sygnał emitowany z sondy powraca do niej silnie osłabiony – rys. 8.4 a.

Oslabienie to jest wynikiem pochłaniania energii sygnału akustycznego przez obiekt badany. Jeżeli w trakcie badania wykryte zostaną wady spoiny (np. w postaci niedoklejeń), sygnał zostaje odbity od granicy materiał – szczelina i powraca do miernika sygnału z nieznacznie zmniejszoną amplitudą, w stosunku do amplitudy sygnału wejściowego – rys. 8.4 b.

a)



b)



Rys. 8.4. Schemat defektoskopu ultradźwiękowego: a) klejenie materiałów silnie adsorbujących fale ultradźwiękowe – sygnał odbity powraca znacznie osłabiony, b) niedoklejenie materiału – odbicie sygnału od granicy tworzywo – szczelina; 1 – sygnał wejściowy, 2 – klejone materiały, 3 – sonda, 4 – spoina klejowa, 5 – sygnał odbity osłabiony przez absorpcję, 6 – niedoklejenie, 7 – sygnał odbity od niedoklejenia, 8 – miernik sygnału

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17, 42]

Przykład defektoskopu ultradźwiękowego przedstawiono na rys. 8.5.



Rys. 8.5. Cyfrowy defektoskop ultradźwiękowy EPOCH 600 [105]

Ultradźwiękowa grupa badań nieniszczących wykorzystuje energię fal akustycznych o wysokiej częstotliwości (50 kHz-25 MHz) [66].

Badania ultradźwiękowe można podzielić według kilku kryteriów:

- ze względu na rodzaj użytej fali (modu),
- ze względu na liczbę użytych piezoelementów,
- ze względu na sposób rozłożenia piezoelementów,
- ze względu na sposób analizy danych.

Dokonując przeglądu światowej i krajowej literatury [29, 34, 37, 38, 45] można zauważyć, że badania ultradźwiękowe w przypadku połączeń klejowych (a szerzej połączeń i złącz adhezyjnych) są wykorzystywane m.in. do:

- wykrywania nieciągłości i wad występujących w spoinie klejowej,
- pomiaru grubości złącza adhezyjnego (np. powłoki nałożonej na podłoże),
- wyznaczanie właściwości akustycznych połączenia lub materiałów je tworzących,
- badania czynników wpływających na propagację fali ultradźwiękowej w różnorodnych połączeniach adhezyjnych.

8.2.4. Metoda emisji akustycznej

Metoda emisji akustycznej (AE) należy do grupy metod ultradźwiękowych. Emisja akustyczna polega na generowaniu fal sprężystych (akustycznych lub wibroakustycznych), które powstają w wyniku wyzwiania energii wiązań międzycząsteczkowych (np. odkształcenia, pękanie, przemiany fazowe) [32, 51, 56].

Aparatura AE nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym obiekcie. W przypadku analizy poprawności wykonania połączeń klejowych, źródłami sygnału emisji akustycznej mogą być różnego rodzaju defekty znajdujące się w spoinie klejowej, w których powstają i propagują się w obiekcie fale sprężyste. Fale sprężyste generowane w źródle EA rozchodzą się od tego źródła we wszystkich kierunkach w objętości monitorowanego obiektu. Fale sprężyste docierają do sensora AE, a następnie są transmitowane do analizatora AE w postaci zmian napięcia elektrycznego.

Przykład systemu do pomiaru sygnałów emisji akustycznej zaprezentowano na rys. 8.6.



Rys. 8.6. Przenośny system do detekcji, identyfikacji i lokalizacji źródeł wyladowań niezupełnych metodą emisji akustycznej [111]

W badaniach metodą emisji akustycznej istotną rolę odgrywają czujniki AE, których przykłady zamieszczono na rys. 8.7.



Rys. 8.7. Czujniki AE Firmy Valen [32]

Jedną z metod akustycznych wykorzystywanych do wykrywania niedoklejeń jest metoda impedancji akustycznej. Impedancję akustyczną definiuje się, jako iloczyn gęstości materiału oraz prędkości dźwięku rozchodzącego się w tym materiale. Ma ona bezpośredni wpływ na charakterystyki wiązek odbitych i przepuszczonych przez dany kontakt mediów, według którego oblicza się współczynnik odbicia fali akustycznej na granicy dwóch ośrodków [32]:

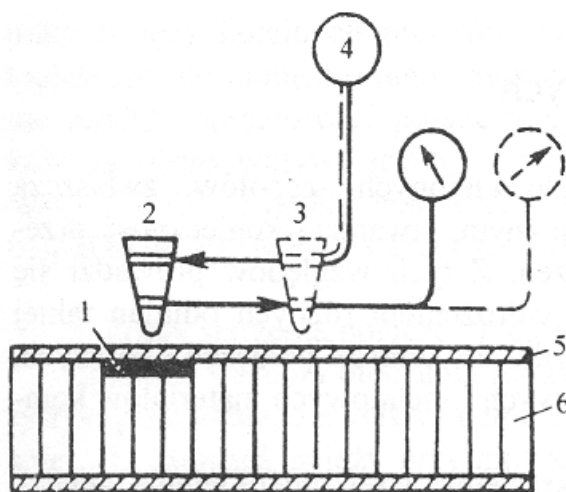
$$R = \frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w}$$

gdzie:

- R – współczynnik odbicia dźwięku na styku dwóch materiałów o różnych impedancjach akustycznych
- Z_w – impedancja akustyczna materiału 1,
- Z_m – impedancja akustyczna materiału 2.

Pozostała część energii niesiona przez falę akustyczną ($1-R \cdot 100\%$) jest pochłaniana przez ośrodek i przekazywana dalej. Z powyższych zależności wynika, że im mniejszy stosunek między impedancjami generatora drgań ultradźwiękowych (lub medium pośredniczącego) a badanym materiałem, tym większa część energii akustycznej drgań zostanie przekazana do obiektu.

Schemat tej metody w odniesieniu do połączeń klejowych przedstawiono na rys. 8.8.



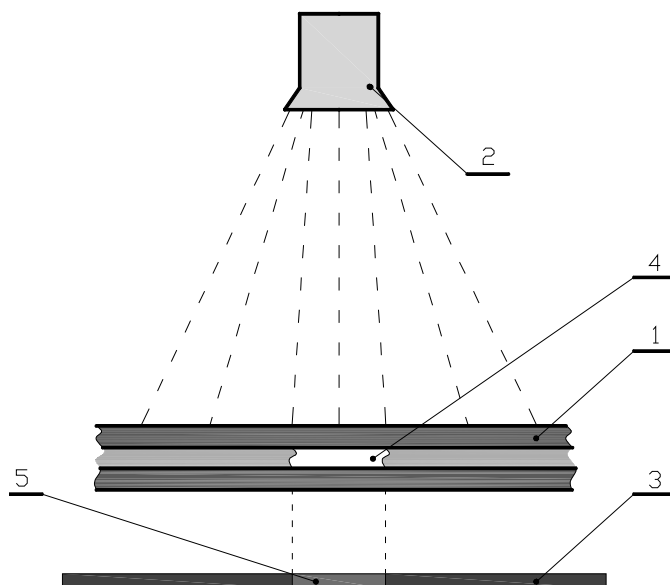
Rys. 8.8. Schemat akustycznej impedancjowej metody kontroli stref niedoklejonych: 1 – waga, 2 – wzбудnik drgań, 3 – odbiornik drgań odbitych, 4 – generator, 5 – pokrycie, 6 – wypełniacz typu „plastra miodu” [42]

Lokalizacja niedoklejeń jest ustalana na podstawie różnicy akustycznej impedancji powierzchni. Tam gdzie znajdują się niedoklejenia zmniejsza się ona i powierzchnia staje się bardziej „miękką” i tą różnicę wychwytuje odbiornik drgań.

8.2.5. Metoda radiologiczna

Metoda radiologiczna umożliwia wykrywanie wewnętrznych oraz powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości obiektów. Istota tej metody polega na naświetlaniu obiektów promieniowaniem jonizującym (np. promieniowaniem rentgenowskim X otrzymywanym z lamp rentgenowskich lub promieniowaniem γ , otrzymywanym ze sztucznych źródeł izotopowych) oraz rejestracji cieniowych obrazów nieciągłości na radiogramach. Metoda ta pozwala na wykrywanie zarówno objętościowych, jak i płaskich nieciągłości, przy spełnieniu określonych procedur badawczych [11, 42, 45].

Metoda badania połączeń klejowych przy użyciu rentgenodefektoskopów polega na prześwietlaniu połączenia klejowego wiązką promieni gamma – rys. 8.9.



Rys. 8.9. Schemat rentgenodefektoskopu: 1 – połączenie klejowe, 2 – źródło promieni (lampa rentgenowska), 3 – błona fotograficzna, 4 – niedoklejenie, 5 – obraz szczeliny

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17, 42]

Obiekt badany 1 znajduje się pomiędzy źródłem światła 2, a błoną fotograficzną 3 umieszczoną w kasce przyrządu. Wykryte wady wewnętrzne połączenia klejowego, obserwuje się na powierzchni błony, w postaci cieniowych obrazów, które kształtem odpowiadają powierzchni niedoklejeń.

Powyższą metodą można zlokalizować miejsce oraz wielkość niedoklejeń, ilość pęcherzy gazowych, wielkość rozwarstwień materiału itp. Jednak metoda ta ma ograniczone zastosowanie w przypadku oceny połączeń klejowych narożnikowych oraz kątowych [17].

W metodzie radiologicznej wykorzystującej promieniowanie γ stosowane są aparaty gammagraficzne o różnej konstrukcji (rys. 8.10). Wyróżnia się aparaty, w których źródło promieniowania γ nie opuszcza pojemnika ochronnego oraz takie, w których źródło promieniowania opuszcza pojemnik ochronny, przy czym w tych ostatnich źródło znajduje się w kanałach o różnych kształcie.



Rys. 8.10. Aparat gammagraficzny ręczny GammaMat SE [116]

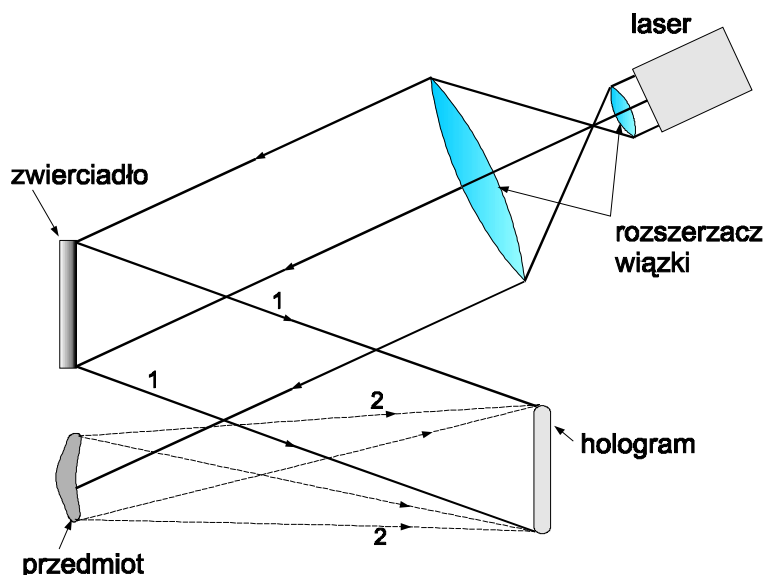
Aparaty gammagraficzne, w których źródło opuszcza pojemnik ochronny, są wyposażone w zabezpieczenia przed niekontrolowanym wysuwaniem się źródła promieniowania i układy sygnalizacji położenia źródła.

8.2.6. Metoda holografii laserowej

Holografia jest dziedziną optyki zajmującej się otrzymywaniem obrazów przestrzennych za pomocą światła spójnego. Jest to tzw. bezsoczewkowa metoda wytwarzania obrazu.

Metoda holografii laserowej polega na wykorzystaniu impulsowego lub ciągłego źródła światła lasera w widzialnym zakresie długości fal, co sprzyja powstawaniu i rejestracji obrazów holograficznych na materiałach światłoczułych o odpowiedniej zdolności rozdzielczej [93]. Oświetlona wiązką światła laserowego klisza (hologram) utrzuła falę świetlną niemal w jej pierwotnej postaci tak, że podczas odtwarzania obrazu efekt wzrokowy jest praktycznie identyczny z efektem oglądania samego przedmiotu [93].

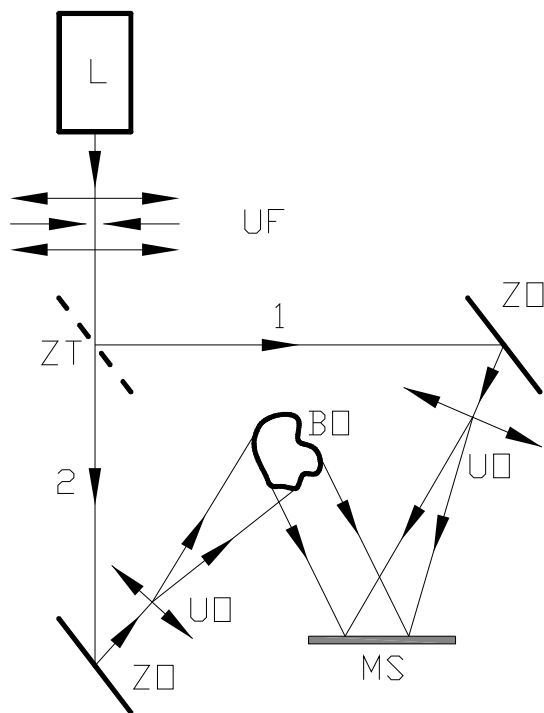
Schemat urządzenia do otrzymywania hologramów zaprezentowano na rys. 8.11.



Rys. 8.11. Schemat urządzenia do otrzymywania hologramów [93]

Badania połączeń klejowych metodą holografii optycznej polega na generowaniu wiązki światła za pomocą laserowego źródła światła w zakresie widzialnych długości fal. Tak wytworzona wiązka zostaje podzielona na wiązkę odniesienia i wiązkę padającą na badany obiekt. Wiązka, która wcześniej została ukierunkowana przez zwierciadła i odpowiednio poszerzona przez układ optyczny, padając na próbkę ulega rozproszeniu i interferuje z wiązką odniesienia w obszarze lokalizacji materiału światłoczułego. Następnie rejestrowane jest pole interferencyjne w materiale światłoczułym, dając pierwszy z dwóch obrazów obiektu badanego. Drugi obraz zostaje uzyskany po obciążeniu badanego połączenia klejowego i różni się występowaniem dodatkowych prążków w materiale światłoczułym. Dzięki otrzymaniu dwóch obrazów, powstaje dwuekspozycyjny hologram, a poprzez porównanie możliwe jest wykrywanie odstępstw od stanu wyjściowego w postaci np. obniżenia wytrzymałości połączenia adhezyjnego [38].

Schemat typowego układu do badań holograficznych przedstawiono na rys. 8.12.



Rys. 8.12. Schemat układu do badań holograficznych metodą dwuekspozycyjną: L – laser, ZT – zwierciadło transmisyjne, ZO – zwierciadło odbijające, UF – układ formujący wiązkę światła, BO – badany obiekt, UO – układ optyczny, MS – materiał światłoczuły, 1 – wiązka odniesienia, 2 – wiązka oświetlająca badany obiekt

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17]

Powyższy układ umożliwia rejestrację rozkładu interferencyjnego, zależnego od kształtu powierzchni badanego obiektu. Naświetlony wiązką odniesienia 1 materiał światłoczuły MS umożliwia, po specjalnej obróbce, rekonstrukcję topografii powierzchni badanego połączenia klejowego, w formie obrazu urojonego lub rzeczywistego. Ocenę wielkości deformacji połączenia, a także ewentualne występowanie obszarów szczególnie obciążonych, przeprowadza się w oparciu o liczbę oraz charakter rozkładu prążków interferencyjnych zarejestrowanych na materiale światłoczułym. Kontrola jakości połączeń klejowych wykorzystujących interferometrię holograficzną pozwala jedynie na wykrywanie i interpretację interferogramów obiektów o nieskomplikowanych kształtach. Analizę ilościową interferogramów obiektów o kształtach złożonych przeprowadza się przy wykorzystaniu metod numerycznych.

8.2.7. Metoda termograficzna

Termografia w podczerwieni jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. W wyniku zastosowania tej metody otrzymuje się obraz (termogram) będący odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu [15, 55, 67].

Badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni można podzielić na procedury badań pasywnych i aktywnych [19, 55]. W procedurach pasywnych obiekt badań charakteryzuje się polem temperatury powstałym w procesie jego funkcjonowania. Dlatego procedury pasywne stosowane są głównie do badań nieniszczących urządzeń lub ich elementów w trakcie funkcjonowania lub krótko po jego zakończeniu, kiedy nadmierne różnice w rozkładzie temperatury na ich powierzchni mogą świadczyć o ich wadliwości. W wyniku obciążeń mechanicznych lub cieplnych, powstałych w trakcie funkcjonowania obiektu badań, defekty wypromieniowują lub pochłaniają energię cieplną, dlatego można je diagnozować (identyfikować) metodami pasywnymi.

W metodach aktywnych wykorzystuje się dodatkowe źródło ciepłej stymulacji (nagrzewania lub chłodzenia) obiektu. Defekty materiałów, mające przed rozpoczęciem badania jednorodną temperaturę, z zasady równą temperaturze otoczenia, nie tworzą „użytecznych” sygnałów temperaturowych i wymagają nagrzewania lub ochładzania całego badanego obiektu lub jego części. W trakcie badania tworzą dynamiczne pole temperatury, a wyniki badania istotnie zależą od czasu obserwacji. Aktywne metody wymagają bardzo często również specjalnych procedur obróbki danych.

W metodzie termografii aktywnej głównym elementem systemu inspekcji jest kamera termowizyjna wyposażona w niechłodzony sensor mikrobolometryczny pracujący w długofalowym zakresie promieniowania podczerwonego [55].

Metody aktywnych badań termograficznych mogą być klasyfikowane uwzględniając m.in.:

- wzajemne położenie źródła ciepłej stymulacji i urządzenia do rejestracji temperatury,
- rodzaj źródła ciepłej stymulacji,
- kształt i wymiary strefy stymulacji ciepła i rejestracji temperatury.

Najczęściej stosowana jest klasyfikacja według wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia do rejestracji temperatury, w której występuje podział na następujące metody [15, 17, 55]:

- odbiciową,
- transmisyjną,
- cieplną stymulację za pomocą wewnętrznego źródła.

Wzajemne położenie źródła ciepłej stymulacji i urządzenia rejestrującego temperaturę wpływa na wykrywalność defektów i jest ważne z punktu widzenia

praktycznej realizacji badania. Stymulację cieplną badanego obiektu można wykonać na drodze nagrzewania lub chłodzenia, co z punktu widzenia termodynamiki jest równoważnościowe przy jednakowej mocy strumienia ciepła. Jednakże, uwzględniając osiągniętą gęstość strumienia ciepła, a także czynnik technologiczności i możliwe przeszkody, bardziej praktyczne jest nagrzewanie.

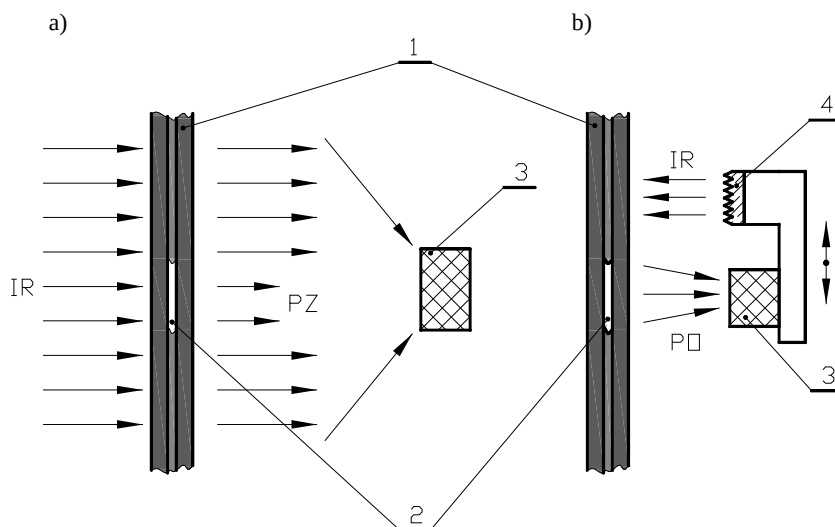
Największą gęstość mocy w strefie stymulacji zapewnia nagrzewanie promieniowaniem optycznym, generowane różnego typu lampami i laserami. Najbardziej prostym sposobem można nagrzać powierzchnię badanego obiektu za pomocą elektrycznych lamp żarowych. Osiągana gęstość nagrzewania może stanowić do kilku kW/m^2 w strefie o średnicy 1 m przy łatwo regulowanej długości nagrzewania.

Metoda odbiciowa, nazywana również procedurą jednostronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po tej samej stronie badanego obiektu [15]. Wadą tej metody jest nierównomierne nagrzewanie całej powierzchni badanego obiektu, co utrudnia wykrywanie defektów oraz zakłócenia spowodowane odbitym promieniowaniem.

Metoda transmisyjna, nazywana również procedurą dwustronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po przeciwnych stronach badanego obiektu [15, 67]. Wymaga ogrzewania całego wyrobu i nie może być zastosowana do grubych obiektów badań. Wpływ nierównomiernego nagrzewania jest znacznie mniejszy.

Stymulacja cieplna za pomocą wewnętrznych źródeł ciepła (np. pobudzanie mechaniczne, ultradźwięki, mikrofae, prądy wirowe) wykazuje brak zakłóceń optycznych, a także to, że temperaturowe anomalie powstają tylko w obszarach z defektami w wyniku tarcia ścianek pęknięć, tworzenia stref plastycznej deformacji i innych mechanicznych efektach.

Termograficzne metody kontroli jakości połączeń klejowych wykorzystują przede wszystkim termograficzną kontrolę w układzie jednostronnym (metoda odbiciowa) oraz w układzie dwustronnym (metoda transmisyjna) – rys. 8.13.



Rys. 8.13. Termograficzna metoda kontroli wad połączeń klejowych: a) w układzie jednostronnym, b) w układzie dwustronnym, 1 – badany obiekt, 2 – strefa wadliwa, 3 – kamera termowizyjna, 4 – lampa podczerwieni, IR – promieniowanie podczerwone, PZ – promieniowanie zahamowane, PO – promieniowanie odbite

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17,42]

W metodach tych obecność wad sygnalizowana jest w wyniku zahamowania strumienia ciepła przechodzącego przez strefy wadliwe (rys. 8.13 a) lub poprzez zwiększenie odbicia promieni podczerwonych (cieplnych) w strefach wad (rys. 8.13 b).

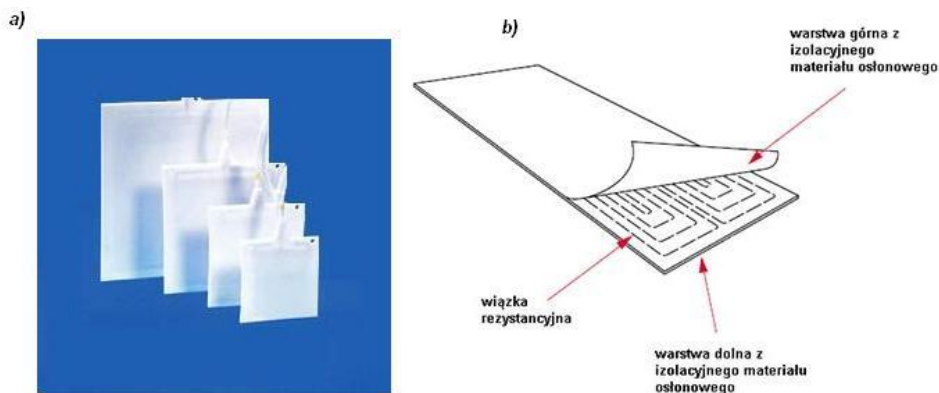
9. Operacje pomocnicze

9.1. Urządzenia grzejne

W przypadku konstruowania połączeń klejowych z wykorzystaniem klejów termoutwardzalnych, niezbędne jest zwiększenie temperatury utwardzanej spoiny, do temperatury koniecznej do zestalenia się poszczególnych składników kleju. W technologii klejenia stosowane są najczęściej następujące sposoby zwiększenia temperatury spoiwa [42]:

- ogrzewanie elektryczne oporowe w komorach grzejnych,
- ogrzewanie elektryczne kontaktowe,
- ogrzewanie ultradźwiękami,
- ogrzewanie dielektryczne,
- ogrzewanie lampami promiennikowymi,
- ogrzewanie podgrzanym czynnikiem znajdującym się w obiegu zamkniętym.

Ze względu na duże zróżnicowanie kształtów połączeń klejowych, ich wymiarów, a także warunków fizycznych zestalania się kleju, konieczny jest dobór odpowiedniego rodzaju i kształtu poszczególnych elementów grzejnych. Przykłady niektórych elementów grzejnych przedstawiono na rys. 9.1.



c)



d)



Rys. 9.1. Typowe elementy grzejne wykorzystywane w urządzeniach do ogrzewania spoiny klejowej: a) maty grzejne, b) budowa maty grzejnej, c) element grzewczy płaski, d) elementy grzejne rurkowe [128]

Przedstawione na rys. 9.1 a oraz rys. 9.1 b maty grzejne, charakteryzują się przede wszystkim małymi wymiarami przekroju poprzecznego. Jednorodne rozmieszczenie ścieżek (średnio, co 6 mm od obrzeża grzałki), w połączeniu z dużą elastycznością maty, pozwala na efektywne oddawanie ciepła. Dzięki temu możliwe jest równomierne nagrzewanie połączeń klejowych o złożonych kształtach.

Elementy grzejne płaskie w obudowie metalowej rys. 9.1 c oraz elementy grzejne rurkowe rys. 9.1 d zabudowywane są głównie w komorach grzejnych. Charakteryzują się one wyższą temperaturą pracy oraz większą mocą nagrzewania w porównaniu z matami grzejnymi.

Przykład urządzenia stosowanego do ogrzewania lampami promiennikowymi zaprezentowano na rys. 9.2.



Rys. 9.2. Promiennik ciepła w podczerwieni [120]

W przypadku zastosowania promienników ciepła w podczerwieni wśród cech charakterystycznych wymienia się m.in.

- szybkie i bardzo oszczędne ogrzewanie,
- wysoka efektywność,
- brak strat ciepła z powodu odpływu ogrzanego powietrza,
- możliwość dowolnego nakierowania ciepła emitowanego przez lampę, co umożliwia tworzenie stref ogrzewanych.

Przy wykonywaniu połączeń z wykorzystywaniem klejów termoutwardzalnych można wykorzystać prasy hydrauliczne i pneumatyczne z wyposażeniem grzewczym [17, 42].

W przypadku klejenia z zastosowaniem ultradźwięków wykorzystuje się drgania radiatora (wywołane przez kryształ piezoelektryczny) zamieniające energię drgań w lepkością reakcję kleju znajdującego się między łączonymi przedmiotami.

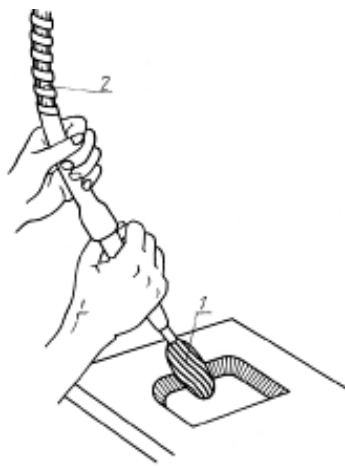
9.2. Przyrządy wykorzystywane do obróbki wykończeniowej

Obróbkę wykończeniową połączeń klejowych wykonuje się po utwardzeniu wycieków kleju, najczęściej za pomocą skrobaków ręcznych, pilników (rys. 9.3) lub przyrządów zmechanizowanych (rys. 9.4).

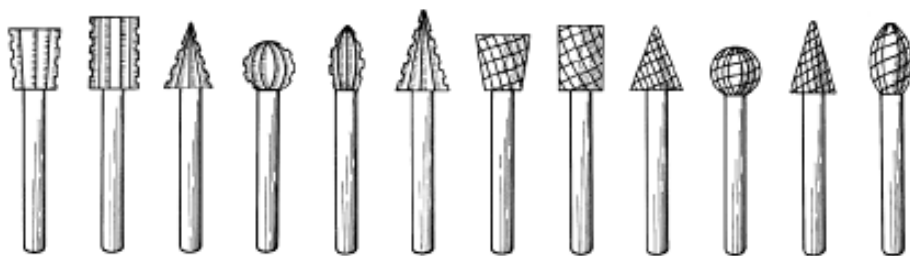


Rys. 9.3. Przykład pilników: a) półokrągły, b) kwadratowy, c) płaski, d) trójkątny [79]

Pilniki, w zależności od kształtu części roboczej, mogą być okrągłe, półokrągłe, płaskie, kwadratowe lub trójkątne. Zróżnicowany kształt części roboczej pozwala na lepsze dopasowanie pilnika do wykonywanej pracy. Pilniki są stosunkowo prostymi narzędziami, które można użyć podczas obróbki wykończeniowej różnego rodzaju połączeń klejowych. Prace szlifierskie wykonywane przy ich pomocy są też dużo bezpieczniejsze niż przy użyciu elektronarzędzi, przy czym należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór narzędzia.



Rys. 9.4. Przykład przyrządu zmechanizowanego do obróbki wykończeniowej: 1 – frez, 2 – giętki przewód [28]

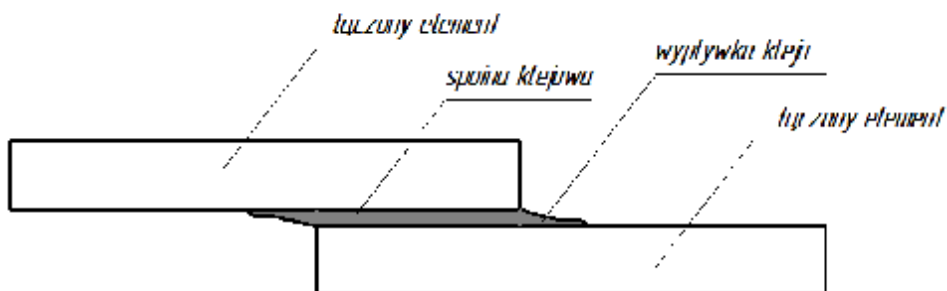


Rys. 9.5. Przykład narzędzi do obróbki ręcznej zmechanizowanej [28]

W przypadku obróbki wykańczającej z zastosowaniem przyrządów zmechanizowanych stosuje się różne przyrządy oraz różnorodnej narzędzia (rys. 9.5),

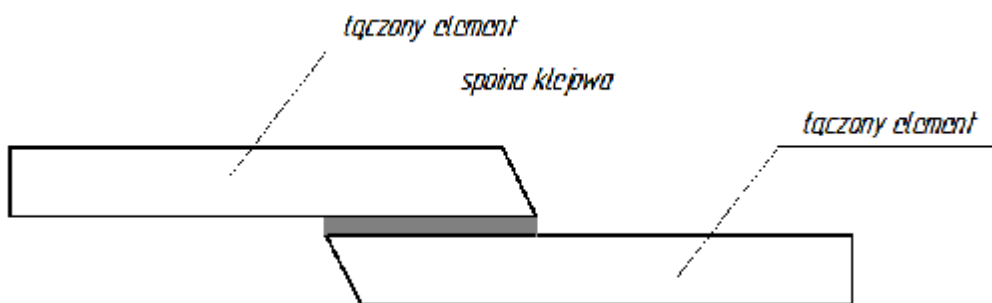
których kształt dobiera się stosownie do określonego kształtu połączenia (dostępności do spoiny klejowej, kształtu łączonych elementów, rodzaju połączenia). Operacje wykończeniowe polegają na usunięciu nadmiaru najczęściej utwardzonego kleju, który powstaje podczas łączenia materiałów. Niekiedy jest korzystne usunięcie nadmiaru kleju (wypływkę) przed jego utwardzeniem poprzez potarcie tkaniną nasączoną odpowiednim rozpuszczalnikiem.

W literaturze spotyka się zalecenia dotyczące pozostawienia części wypływkę, znajdującej się w narożu połączenia, ponieważ przyczynia się to do obniżenia koncentracji naprężeń w spoinie klejowej na końcu zakładki (rys. 9.6).



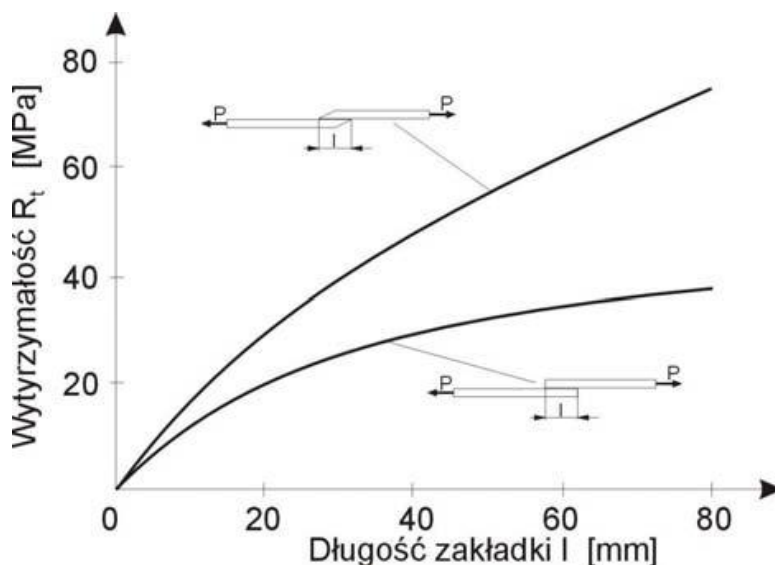
Rys. 9.6. Wypływka kleju w połączeniu jednozakładkowym

Do obróbki wykończeniowej należy też ukosowanie krawędzi łączonych elementów (rys. 9.7).



Rys. 9.7. Połączenia klejowe jednozakładkowe z ukosowanymi końcami zakładki

Zastosowanie ukosowania krawędzi łączonych elementów (dzięki czemu następuje zmniejszenie ich sztywności) przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych jednozakładkowych obciążonych na ścinanie, dzięki temu, że następuje wyrównanie rozkładu naprężeń stycznych w spoinie klejowej (rys. 9.8).



Rys. 9.8. Wpływ zukosowania końców zakładki na wytrzymałość połączeń klejowych zakładkowych obciążonych na ścinanie [27]

Jako obróbkę wykończeniową połączeń klejowych można również wykorzystać nanoszenie różnego rodzaju powłok, w tym powłok malarskich. Stosuje się je w celu ograniczenia wnikania wilgoci oraz wody do strefy adhezyjnej, a także ochrony przed korozją. Przykładem powłok mogą być powłoki lakierowe epoksydowe, utworzone na bazie żywic epoksydowych. W zależności od wymagań ochronnych stosowane są różne lakiery zarówno jednoskładnikowe (np. epoksydowo-fenolowe, mocznikowe), jak i lakiery dwuskładnikowe (np. epoksydowe utwardzane aminami, epoksydowo-poliamidowe). Lakiery mogą być rozpuszczalnikowe oraz bezrozpuszczalnikowe [10]. Ponadto często wykorzystywane są epoksydowe kompozycje proszkowe, a jedną z podstawowych ich zalet jest brak rozpuszczalników, czego efektem jest mniejsze zużycie ilości surowców i energii. W przybliżeniu zużycie farby proszkowej wynosi 1/3 zużycia lakieru rozpuszczalnikowego. Utwardzone powłoki charakteryzują się szczelnością, dobrą przyczepnością, dużą wytrzymałością i odpornością cieplną oraz są one nieporowate. Właściwości powłoki są zależne przede wszystkim od zestawu składników proszków i technologii jego wytwarzania, przy czym istotnie wpływa rodzaj utwardzacza [10, 18].

10. Zakończenie

Przedstawione opracowanie nie wyczerpuje całkowicie zagadnienia dotyczącego wielu aspektów stosowania i projektowania oprzyrządowania technologicznego w procesie klejenia.

Wykorzystywanie różnorodnych połączeń klejowych w wielu konstrukcjach, wykonywanie połączeń różniamiennych materiałów, a także właściwości klejów stanowią inspirację do projektowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów stosowanych w poszczególnych etapach procesu klejenia.

Specyfika operacji klejarskich determinuje wybór zarówno konstrukcji oprzyrządowania, jak i jego zastosowanie. Duża różnorodność tych operacji wymusza przeprowadzanie analizy poszczególnych etapów klejenia, których charakterystyka determinuje rozwiązania konstrukcyjne przyrządów, a także materiały, z których są one wykonane.

Istotnym czynnikiem wpływającym na rozwiązanie konstrukcyjne oprzyrządowania jest rodzaj produkcji. Ze względów ekonomicznych w przypadku produkcji jednostkowej często wykorzystuje się różnego rodzaju oprzyrządowanie stosowane podczas wykonywania innych rodzajów połączeń. W tym przypadku wykorzystuje się często proste ręczne przyrządy i uchwyty. Natomiast w produkcji masowej stosowane są zautomatyzowane urządzenia, które mogą pracować na przykład w automatycznych liniach montażowych.

Nie mniej ważnym czynnikiem wpływającym na dobór oprzyrządowania jest rodzaj wykonywanych połączeń. Przykładowo wykonując połączenia tulejowe ważny jest wybór właściwych elementów (m.in. ustalających) dedykowanych do powierzchni walcowych zewnętrznych lub wewnętrznych. Natomiast w przypadku wykonywania połączeń zakładkowych jest konieczne zastosowanie właściwych elementów umożliwiających uzyskanie jednakowej długości zakładki. Kształt i wymiary połączenia wpływają także na określenie konstrukcji przyrządów i elementów służących do wywierania ciśnienia, przy czym należy zwrócić uwagę, aby zastosować nacisk powierzchniowy. Często jest wskazane, zwłaszcza podczas utwardzania kleju jednostopniowego na gorąco, aby urządzenia jednocześnie umożliwiały podgrzewanie i utrzymywanie połączenia klejowego w określonej temperaturze, przy jednoczesnym wywieraniu właściwej wartości ciśnienia.

Od zaplanowanego sposobu przygotowania powierzchni uzależniony jest dobór zarówno urządzeń, narzędzi, jak i mediów obróbkowych (np. rodzaj środków odłuszczających). Wpływa to na wybór techniki wykonywania operacji przygotowania powierzchni, co wiąże się także z doбором odpowiedniego oprzyrządowania. Przy czym należy zwrócić uwagę na aspekty także bezpieczeństwa pracy ze środkami chemicznymi, nie tylko w tej operacji, ale także w operacji kolejnej – przygotowania kleju. Te aspekty przyczyniają się niekiedy do przyjęcia odpowiednich założeń konstrukcyjnych przyrządów klejarskich.

Operacjami, w których występuje największa różnorodność oprzyrządowania są: operacja przygotowania kleju oraz operacja nakładania kleju na łączone powierzchnie. W operacji przygotowania kleju występujące czynności takie jak: dozowanie składników oraz mieszanie w zależności m.in. od rodzaju kleju i jego właściwości wymuszają stosowanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów i urządzeń. Przykładowo uzyskanie jednakowej powtarzalnej grubości spoiny klejowej wpływa na poprawność wykonania połączeń klejowych także w aspekcie uzyskiwania określonej, powtarzalnej wytrzymałości połączeń.

Podsumowując, podczas projektowania oprzyrządowania należy uwzględnić zarówno jego funkcje, jakie ma spełnić w określonej operacji, jak i charakterystykę połączenia klejowego. Ponadto niezwykle ważna jest charakterystyka operacji procesu klejenia, która determinuje konstrukcję przyrządów. Poprawne zaprojektowanie oraz wykonanie przyrządów klejarskich, wpływa na poprawność wykonywanych połączeń klejowych, co ma także wymiar ekonomiczny.

Literatura

1. Adams R.D., Harris J.A., *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*, International Journal of Adhesion and Adhesives 1987, 7, 69–80.
2. Adams R.D., Cawley P., *A review of defect types and NDT techniques for composites and bonded joints*, Materials Science & Technology, 1989, 5, 413–425.
3. Anicai L., Trifu C., Dima L., *Anodic oxidation and coloring of aluminum powders*. Metal Finishing 2000, 98, 20–25.
4. Apalak M.K., Engin A., *Effect of adhesive free-end geometry on the initiation and propagation of damaged zones in adhesively bonded lap joints*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2004, 18, 529–559.
5. Anodising, dostęp: <http://pl.wikipedia.org/> (10.08.2012).
6. Axentowicz M., Karpiński J., *Kleje jedno- i dwuskładnikowe produkcji Ciba-Geigy oferowane jako Araldit 2000 oraz Araldit 4000*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 2, 43–46.
7. Bartnicki Ł., *Połączenia klejowe w procesach montażu maszyn. Projekt stanowiska klejarskiego do składania i pozycjonowania wybranych typów połączeń*. Praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, Lublin, 2006.
8. Bartnicki Ł., *Projekt stanowiska klejarskiego do składania współosiowych połączeń klejowych*, Praca magisterska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2008.
9. Brockmann W., Geiß P.L., Klingen J., Schröder B., *Adhesive bonding. Materials, Applications and Technology*, Germany, Wiley-Vch Press, Weinheim, 2009.
10. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P., *Żywice epoksydowe*, Warszawa, WNT, 1982.
11. Brózda J., Czuchryj J., *Radiografia złączy spawanych*, Gliwice, Instytut Spawalnictwa, 2005.
12. Cagle C. V. (red.), *Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika*. Warszawa, WNT, 1977.
13. Chołodkova A., *Modułowe mechanizmy montażu precyzyjnych cylindrycznych połączeń klejowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 1995, 4, 24–26.
14. Croccolo D., Cuppini R., *Adhesive defect density estimation applying the acoustic emission technique*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29, 234–239.
15. Czajka P., Mężyk J., Mizak W., *Zastosowanie inspekcji termowizyjnej do oceny poprawności montażu połączeń rurowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 288, Mechanika 85, 2013, 5–17.

16. Czaplicki J., Ćwikliński J., Konar P., *Technologia klejenia, Cz. I*, Warszawa, WKiŁ, 1983.
17. Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P., *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*, Warszawa, WKiŁ, 1987.
18. Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pielichowski J., *Chemia i technologia żywic epoksydowych*. Warszawa, WNT, 2002.
19. Czuchryj J., Sikora S., *Metody i techniki badań nieniszczących złączy spawanych*, Gliwice, Instytut Spawalnictwa, 2014.
20. da Silva L.F.M., Adams R.D., *Adhesive joint at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 216–226.
21. da Silva L.F.M., Adams R.D., *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27, 227–235.
22. Dobrzański L.A., Dobrzańska-Danikiewicz A.D., *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, Open Access Library, 2011, 5, Rozdział 7, 42–367 (<http://www.openaccesslibrary.com/vol05/7.pdf>).
23. Dobrzański T.: *Przyrządy i uchwytów obróbkowe. Poradnik konstruktora*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1987.
24. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1997.
25. Godzimirski J., *Czynniki kształtujące wytrzymałość połączeń klejowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 4, 61–64.
26. Godzimirski J., *Projektowanie połączeń klejowych*, [w:] Technika i Technologia Montażu Maszyn, Materiały 3 Konferencji Naukowo–Technicznej, Rzeszów–Jawor, 1997, 113–122.
27. Godzimirski J., *Problemy klejenia konstrukcyjnego*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2009, 1, 25–31.
28. Górecki A., *Technologia ogólna. Podstawy technologii mechanicznych*. Warszawa, WSiP, 2009.
29. Guyott C.C.H., Cawley P., Adams R.D., *The non-destructive testing of adhesively bonded structure: a review*. Journal of Adhesion, 1986, 20, 129–159.
30. Habenicht G., *Applied Adhesive Bonding, Germany*, Wiley-Vch Press, Weinheim, 2006.
31. Harris A.F., Beevers A., *The effect of grit-blasting on the surface properties for adhesion*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999, 19, 445–452.

32. Hasse L., Spiralski L., Šikula J., *Pomiar i obróbka sygnałów emisji akustycznej w diagnostyce obiektów*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2004, 20, 77–84.
33. Hlebowicz J., Kalla Ch., *Badania wizualne. Część 2*, Warszawa, Biuro Gamma, 1998.
34. Holownia B.P., *NDT of adhesive joints affected by water ingression*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987, 7, 25–29.
35. Jang J., Jang I., Kim H., *Effect of the mole ratios of silane-modified polyvinylimidazoles on adhesion promotion of the polyimide/copper system*, Journal of Adhesion Science and Technology, 1998, 12, 323–337.
36. Jialanella G.L., Shaffer II E.O., *The effect of adhesive modulus on the performance of SMC lap shear joints*, Journal of Adhesion Science and Technology, 1993, 7, 1171–1181.
37. Kowalczyk J., *Non-destructive methods for the evaluation of methods of adhesive joints*, Scientific Notebooks, Poland, Poznan University of Technology 2008, 63, 45– 50, (dostęp: <http://yadda.icm.edu.pl>).
38. Kowalczyk J., *Ocena połączeń klejowych metodą ultradźwiękową*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, 2009, praca zdeponowana w Czytelnii Oddziału Informacji Naukowej Politechniki Poznańskiej.
39. Kozak W., *Projekt uchwyty specjalnego do wykonywania połączeń klejowych elementów osiowo-symetrycznych*. Praca dyplomowa. Politechnika Lubelska, Lublin, 2012.
40. Krysztafkiewicz A., *Czynniki poprawiające adhezję w układzie napelniaacz-polimer*, Chemia Stosowana, 1989, 4, 561–584.
41. Kuczmazewski J., Rudawska A., *Klejenie i uszczelnianie w technologii montażu*. Technologia i Automatyzacja Montażu 1997, 3, 25–29.
42. Kuczmazewski J., *Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia*, Lublin, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1990.
43. Kuczmazewski J., *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*, Lublin, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1995.
44. Kuczmazewski J.: *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, Lublin, Polish Academy of Science, Lublin Branch, 2006.
45. Lewińska-Romnicka A., *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*, Warszawa, WNT, 2001.
46. Łunarski J., *Połączenia klejone w procesach montażu*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 2, 2–5.
47. Łunarski J., Zielecki W., *Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych*, Technologia i Automatyzacji Montażu, 1994, 2, 3–16.

48. Mądry K., *Anodising of aluminium*, (dostęp: <http://www.galwanizernie.pl> – 15.08.2012).
49. Mirski Z., Piwowarczyk T., *Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości*, Przegląd Spawalnictwa, 2008, 8, 12–21.
50. Mohseni M., Mirabedini M., Hashemi M., Thompson G.E., *Adhesion performance of an epoxy clear coat on aluminum alloy in the presence of vinyl and amino-silane primers*. Progress in Organic Coatings, 2006, 57, 307–313.
51. Ollendorf H., Schülke T., Schneider D., *Testing the adhesion of hard coating including the non-destructive technique of surface acoustic waves*. In: Ed K.L.Mittal K.L. Adhesion Measurement of Films and Coatings, 2, 49–77, VSP 2001.
52. Patent Skorotron - Ladeeinrichtung EP 0004380 B1 (dostęp: <http://www.google.at/patents/EP0004380B1> – 12.06.2014).
53. Pawlak S., Różański M., Stano S., Muzia G., *Termografia aktywna jako nowa metoda badań nieniszczących połączeń zakładkowych spawanych laserowo*, Przegląd Spawalnictwa, 2014, 3, 4–10.
54. Pielichowski J., Puszyński A., *Technologia tworzyw sztucznych*, Warszawa, WNT, 2003.
55. Praca zbiorowa, *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Warszawa, PAK, 2004.
56. Ranachowski Z., *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych*, Drogi i Mosty, 2012, 2, 65–87.
57. Rudawska A., Chruściel M., *Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych lotniczego stopu aluminium*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2011, 2, 42–46.
58. Rudawska A., Kuczmarszewski J., *Klejenie blach ocynkowanych*, Lublin, Wydawnictwa Uczelniane PL, 2005.
59. Rudawska A., Miturska I., *Uchwyt do mocowania próbki połączenia klejowego doczołowego*, Zgłoszenie patentowe nr P.404296.
60. Rudawska A., *Mieszanie, dozowanie i nakładanie kleju w montażu automatycznym*, Materiały konferencyjne, 11th International Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing, 03–05.May, 2010, Žilina-Turcianske Teplice, Slovak Republic, 36–39.
61. Rudawska A., *Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2010, 3, 36–39.
62. Sarnow L.A., *Urządzenia do nakładania hermetyków, smarów i cyjanoakrylowych klejów*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 1993, 1, 34–36.
63. Sikora R., *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje, właściwości i struktura*, Lublin, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1991.

64. Szalińska H., Miszczyk A., *Próba oceny wpływu promotora adhezji na właściwości barierowe powłoki epoksydowej z płatkami szklanymi*, Polimery, 1996, 41, 232–236.
65. Szlezyngier W., *Właściwości modyfikowanych klejowych żywic epoksydowych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1994, 3, 35–36.
66. Śliwiński A., *Ultradźwięki i ich zastosowania*, Warszawa, WNT, 2001.
67. Świdorski W., *Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych*, dostęp: www.yadda.icm.edu.pl (wrzesień, 2015).
68. Taib A.A., Boukhili R., Achiou S., Gordon S., Boukehili H., *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26, 226–236.
69. Walker P., *Organosilanes as adhesion promoters*, Journal of Adhesion Science and Technology, 1991, 5, 279–305.
70. Ulbrich D., *Badanie połączenia adhezyjnego powłoki z podłożem*, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2015.
71. Żenkiewicz M., *Płomieniowe modyfikowanie warstwy wierzchniej wytworów tworzywowych*, Polimery, 2000, 45, 81–88.
72. Żenkiewicz M., *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*, Warszawa, WNT, 2000.
73. Żuchowska D., *Polimery konstrukcyjne*, Warszawa, WNT, 2000.

Strony internetowe

74. www.acralock.pl (wrzesień, 2015)
75. www.aluxsklep.pl (październik, 2015)
76. www.amb.pl (styczeń, 2008)
77. www.ambersil.ajm.pl (wrzesień, 2012)
78. www.badania-nieniszczace.info (wrzesień, 2015)
79. www.castorama.pl (wrzesień, 2015)
80. www.bioeko.pl (marzec, 2013)
81. www.ceetal.pl (czerwiec, 2015)
82. www.chemia-techniczna.com.pl (wrzesień, 2012)
83. www.chemiatechniczna.com (wrzesień, 2012)
84. www.contracor.com.pl (maj, 2014)
85. www.devcon.com (styczeń, 2008 r.)
86. www.diolut.pl (czerwiec 2014)
87. www.ekopil.com (czerwiec, 2014)
88. www.ekosklad.pl (czerwiec, 2015)
89. www.e-spawalnik.pl (marzec, 2012)
90. www.famad.com.pl (styczeń, 2008)
91. www.fluent.com (styczeń, 2008)

92. www.fluidymetechnologies.com (luty, 2008)
93. www.ftims.pg.edu.pl (wrzesień 2015)
94. www.grunt-mar.pl (wrzesień, 2014)
95. www.hafen.pl (czerwiec, 2015)
96. www.hydrauliczneprasy.wordpress.com (wrzesień, 2015)
97. www.im.mif.pg.gda.pl (wrzesień, 2013)
98. www.interchemall.pl (czerwiec, 2014)
99. www.intersonic.pl (kwiecień, 2013)
100. www.isklep24.ronar.com.pl (maj, 2015)
101. www.izo.pl (czerwiec, 2013)
102. www.jls-europe.de (styczeń, 2008)
103. www.kipp.pl (październik, 2015)
104. www.kleje-przemyslowe.pl (wrzesień, 2013)
105. www.konstrukcjetalowe.info (luty 2012)
106. www.loctite-kleje.pl (lipiec, 2014)
107. www.logismarket.pl (wrzesień, 2015)
108. www.lubuskieremonty.pl (maj, 2013)
109. www.maszyny.agencja-amk.com.pl (marzec, 2014)
110. www.mierzejewski.pl/pl/blona-klejowa.html (czerwiec, 2012)
111. www.mldt.pl (wrzesień, 2015)
112. www.narzedzia.sklepy24h.pl (wrzesień, 2015)
113. www.narzedziomis.pl (wrzesień, 2015)
114. www.ndt.pl (wrzesień, 2015)
115. www.ndt-imbn.com (luty, 2012)
116. www.ndt-system.com.pl (wrzesień, 2015)
117. www.nordson.com (wrzesień, 2015)
118. www.ntr.com.pl (wrzesień, 2015)
119. www.olympus-ims.com (wrzesień, 2015)
120. www.ogrzej.eu (wrzesień, 2015)
121. www.plastech.pl (lipiec, 2012)
122. www.prox.info.pl (maj, 2013)
123. www.rais.pl (wrzesień, 2015)
124. www.remexpolska.pl (wrzesień, 2015)
125. www.rolep.plona-klejowa (czerwiec, 2014)
126. www.ru.all.biz (wrzesień, 2015)
127. www.rytm-l.pl (wrzesień, 2012)
128. www.selfa.pl (luty, 2008)
129. www.solutions.3m.co.uk (wrzesień, 2015)
130. www.techconcept.pl (październik, 2015)
131. www.techform.pl (wrzesień, 2012)
132. www.transwest.pl (czerwiec, 2014)