

Automatyzacja procesów montażu

Zagadnienia ogólne automatyzacji montażu

AUTOMATYZACJA – to wprowadzenie środków technicznych w celu samoczynnego sterowania i kontrolowania procesu wytwarzania. W odróżnieniu od mechanizacji, która zastępuje tylko fizyczną pracę człowieka, automatyzacja ma na celu wyeliminowanie bezpośredniego udziału człowieka z procesu wytwarzania i przeniesienie go do działań o charakterze programowania i ogólnego nadzoru. Automatyzacja może obejmować:

- **środki wytwarzania i montażu,**
- **poszczególne składniki procesu wytwarzania (np. transport, manipulację, magazynowanie, kontrolę przedmiotów)**
- **cały proces wytwarzania lub montażu**

Zagadnienia ogólne automatyzacji montażu

ELASTYCZNA AUTOMATYZACJA WYTWARZANIA – oznacza automatyzację umożliwiającą łatwe i szybkie przebrojenie oraz łatwą i szybką zmianę programów pracy środków wytwarzania, w dostosowaniu do zmieniających się zadań produkcyjnych.

Przeciwieństwem automatyzacji elastycznej jest automatyzacja sztywna, która w skrajnym przypadku dostosowana jest do produkcji tylko jednego rodzaju wyrobu, bądź przebrojenie na inną produkcję jest bardzo czasochłonne i kosztowne.

Zagadnienia ogólne automatyzacji montażu

Do podstawowych trudności w zakresie mechanizacji i automatyzacji procesów technologicznych montażu można zaliczyć:

- niski poziom technologiczności konstrukcji wyrobów ze względu na wymagania automatycznego montażu,
- małą seryjność produkowanych wyrobów ograniczającą ekonomiczną efektywność automatyzacji,
- zbyt długi okres opracowywania i wdrażania środków automatyzacji, *co przy częstej zmianie obiektów produkcji pozwala najwyżej zwrócić poniesione nakłady, lecz nie przynosi wyraźnych zysków,*
- trudności kooperacyjne w zakresie uzyskania standardowych, znormalizowanych zespołów do celów automatyzacji.

Zagadnienia ogólne automatyzacji montażu

Pod względem stopnia zautomatyzowania prac montażowych można je podzielić następująco:

- częściowa automatyzacja operacji montażowych przewidująca udział w nich pracownika w zakresie czynności sterujących lub podająco-odbierających,
- pełna automatyzacja operacji montażowych realizowanych bez udziału operatora,
- częściowa automatyzacja procesu technologicznego montażu zespołu lub wyrobu przewidująca udział w nim pewnej liczby operatorów (mniej niż operacji),
- całkowita automatyzacja procesu technologicznego montażu zespołu lub wyrobu (bez udziału operatorów),
- elastyczna automatyzacja grupy podobnych procesów technologicznych montażu z udziałem lub bez operatorów.

Wydajność i niezawodność montażu

W projektowaniu procesów technologicznych, organizacji prac montażowych szczególnie ważne są zagadnienia **wydajności montażu**. Pozwalają one bowiem określić, na etapie projektowania, efektywność ekonomiczną przedsięwzięcia.

Przez pojęcie **wydajności** należy rozumieć liczbę zmontowanych w jednostce czasu (godzina, zmiana, doba itp.) zespołów lub wyrobów:

$$W = \frac{F_o}{T_m}$$

F_o – liczba zmontowanych części lub zespołów,

T_m - czas montażu części lub zespołu na stanowisku,

Wydajność i niezawodność montażu

W przypadku zautomatyzowanych systemów maszyn montażowych (rotorowych, liniowych) zmontowaną jednostkę uzyskuje się po każdym takcie pracy systemu niezależnie od tego ile pozycji montażowych znajduje się w systemie.

Przy obliczaniu teoretycznej wydajności (nie uwzględniającej przestojów z przyczyn techniczno-organizacyjnych) w takim układzie do wzoru zamiast T_m wystarczy podstawić wartość *taktu* t , tzn.

$$W = \frac{F_o}{t}$$

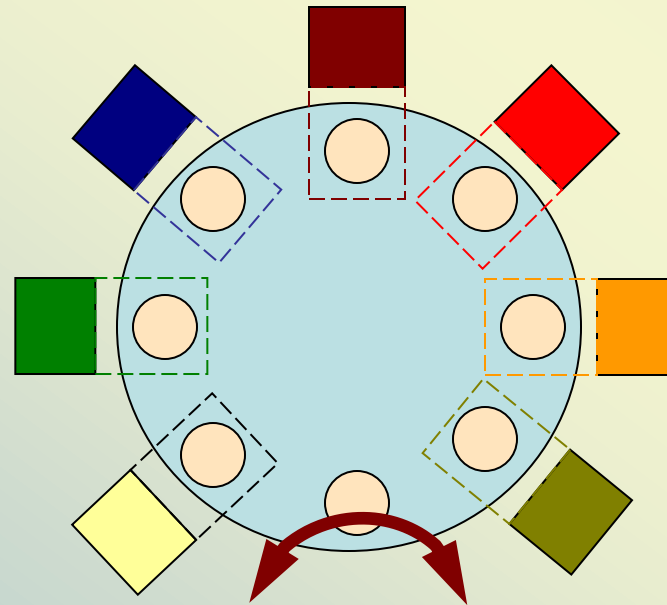
Wydajność i niezawodność montażu

Wydajność montażu zautomatyzowanego jest determinowana:

- **niezawodnością technologiczną** (zależną od wybranego procesu technologicznego, sposobów bazowania, jakości części dostarczanych do montażu automatycznego),
- **niezawodnością stanowiska (automatu, systemu) montażowego** (zależną od przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych, jakości wykonania i montażu zespołów)

Wydajność i niezawodność montażu

Rozpatrzmy przykład linii automatycznej 8 – stanowiskowej z czasem obrotu (za pomocą krzyża maltańskiego) $t_1 = 3s$ i czasem przestoju (podczas którego są wykonywane czynności montażowe) $t_2 = 5s$. W przypadku idealnej pracy w czasie taktu $\tau = 8s$ uzyskuje się jeden zmontowany zespół, co odpowiada wydajności $W_1 = 450$ zesp./h ($3600s / 8s$).



Wydajność i niezawodność montażu

Założmy, że na każdej pozycji awaria następuje raz na 100 cykli montażowych, tzn. prawdopodobieństwo awarii wynosi $p = 0.01$, a prawidłowej pracy $p_1 = 0,99$. Dla 8 pozycji ($m = 8$) prawdopodobieństwo prawidłowej pracy wyniesie:

$$p_2 = p_1^m = 0,99^8 = 0,9227$$

tzn. w czasie 10 000 cykli zostanie wykonanych $N_2 = 9277$ zespołów, na co zostanie zużyty czas:

$$t_3 = N_2 \cdot \tau = 9277 \cdot 8 = 20,5 \text{ h}$$

Wydajność i niezawodność montażu

W czasie pozostałych cykli $N_3 = 10000 - 9277 = 773$ co najmniej na jednej pozycji nastąpi awaria lub usterka, której średni czas usuwania przyjmijmy $t_4 = 10$ min. Łączny czas przestojów z powodu usterek wyniesie:

$$t_5 = N_3 \cdot t_4 = 773 \cdot 10 = 128,83 \text{ h}$$

Łączny czas montażu 9227 zespołów będzie równy:

$$t_6 = t_3 + t_5 = 20,5 + 128,83 = 149,33 \text{ h}$$

Czas przestojów w procentach łącznego czasu wytwarzania wyniesie:

$$t_7 = \frac{100 \cdot t_5}{t_6} = \frac{128,83 \cdot 100}{149,33} = 86,3 \%$$

Wydajność i niezawodność montażu

W efekcie wynikowa wydajność z uwzględnieniem przestojów będzie równa:

$$W_2 = \frac{N_1}{t_6} = \frac{9227}{149,33} = 62,8 \text{ zesp/godz.}$$

Współczynnik wykorzystania linii montażowej (stosunek wydajności rzeczywistej do teoretycznej) wyniesie:

$$U_w = \frac{100 \cdot W_2}{W_1} = \frac{100 \cdot 62,8}{450} = 13,7 \%$$

Gdy poziom usterek wynosi 1% ($p = 0,01$), to w trakcie montażu obserwuje się zmniejszenie współczynnika wykorzystania o 86,3%. Najczęstszą przyczyną zatrzymań linii montażowej jest zła jakość elementów montowanych (przyczyna 80 – 90 % przerw). Poprawiając ich jakość można znacznie zwiększyć niezawodność pracy linii.

Wydajność i niezawodność montażu

Zakładając że w poprzednim przykładzie 90 % zatrzymań było spowodowanych złą jakością elementów montowanych i że została ona tak poprawiona, że nie stanowi przyczyny zatrzymań można stwierdzić, że liczba przerw zmniejszy się z 1 na 100 cykli do 1 na 1000 cykli, tzn. prawdopodobieństwo poprawnej pracy wyniesie:

$$p_2' = 0,999^8 = 0,9920$$

czyli w ciągu 10000 cykli zostanie zmontowanych $N_3 = 9920$ zespołów w czasie

$$t_8 = N_3 \cdot \tau = 9920 \cdot 8 = 22,04 \text{ h}$$

Wydajność i niezawodność montażu

W czasie pozostałych $N_4 = 10000 - 9920 = 80$ cykli wystąpią przerwy wymagające usunięcia w czasie $t_9 = 10$ min, na co łączny czas wyniesie:

$$t_{10} = N_4 \cdot t_9 = 80 \cdot 10 = 13,33 \text{ h}$$

Wówczas całkowity czas na zmontowanie 9920 zespołów będzie równy:

$$t_{11} = t_8 + t_{10} = 22,04 + 13,33 = 35,37 \text{ h}$$

Natomiast czas przestojów w procentach łącznego czasu wytwarzania wyniesie:

$$t_{12} = \frac{100 \cdot t_{10}}{t_{11}} = \frac{13,33 \cdot 100}{35,37} = 38 \%$$

Wydajność i niezawodność montażu

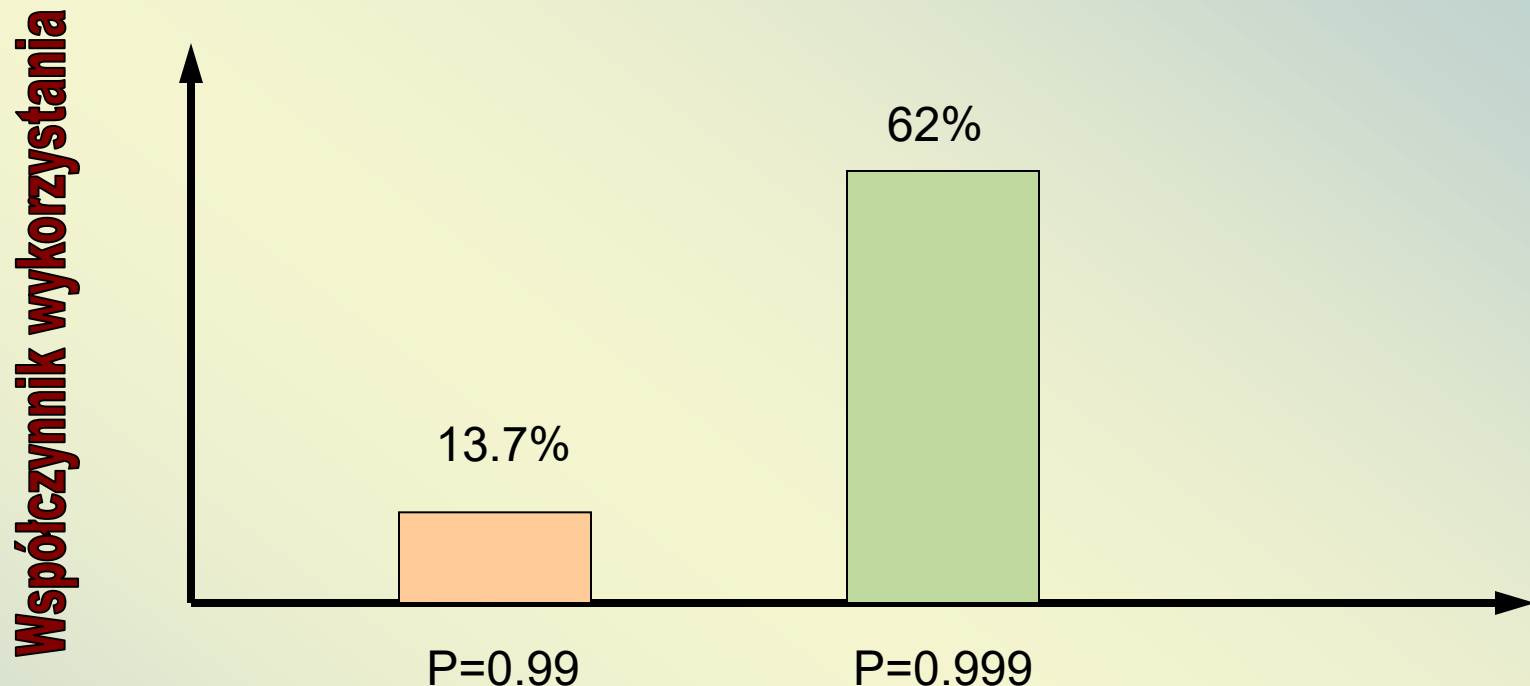
Wydajność w czasie 10000 cykli obliczamy następująco:

$$W_3 = \frac{N_3}{t_{11}} = \frac{9920}{35,37} = 280,46 \text{ zesp/godz}$$

Współczynnik wykorzystania linii montażowej (stosunek wydajności rzeczywistej do teoretycznej) wyniesie:

$$U_w = \frac{100 \cdot W_3}{W_1} = \frac{100 \cdot 280,46}{450} = 62 \%$$

Wydajność i niezawodność montażu



Współczynnik wykorzystania 62% jest znacznie większy niż poprzednio (13,7%). Wskazuje to na znaczne możliwości zwiększenia niezawodności montażu poprzez:

- zastosowanie odpowiedniej metody montażu,
- zapewnienie wymaganej dokładności urządzeń wchodzących w skład łańcucha kinematycznego operacji montażowej,
- zapewnienie technologiczności konstrukcji części maszyn.

Czynniki konstrukcyjno-technologiczne powodujące błędy w montażu automatycznym

Błąd wzajemnego orientowania łączonych części zależy od konstrukcji urządzenia montażowego, dokładności jego poszczególnych mechanizmów, dokładności wykonania części i zespołów dochodzących do montażu, oraz przyjętych sposobów bazowania. Powstaje on wskutek niemożliwości wykonywania dokładnie powtarzających się ruchów organów realizujących wzajemne orientowanie.

Czynniki konstrukcyjno-technologiczne powodujące błędy w montażu automatycznym

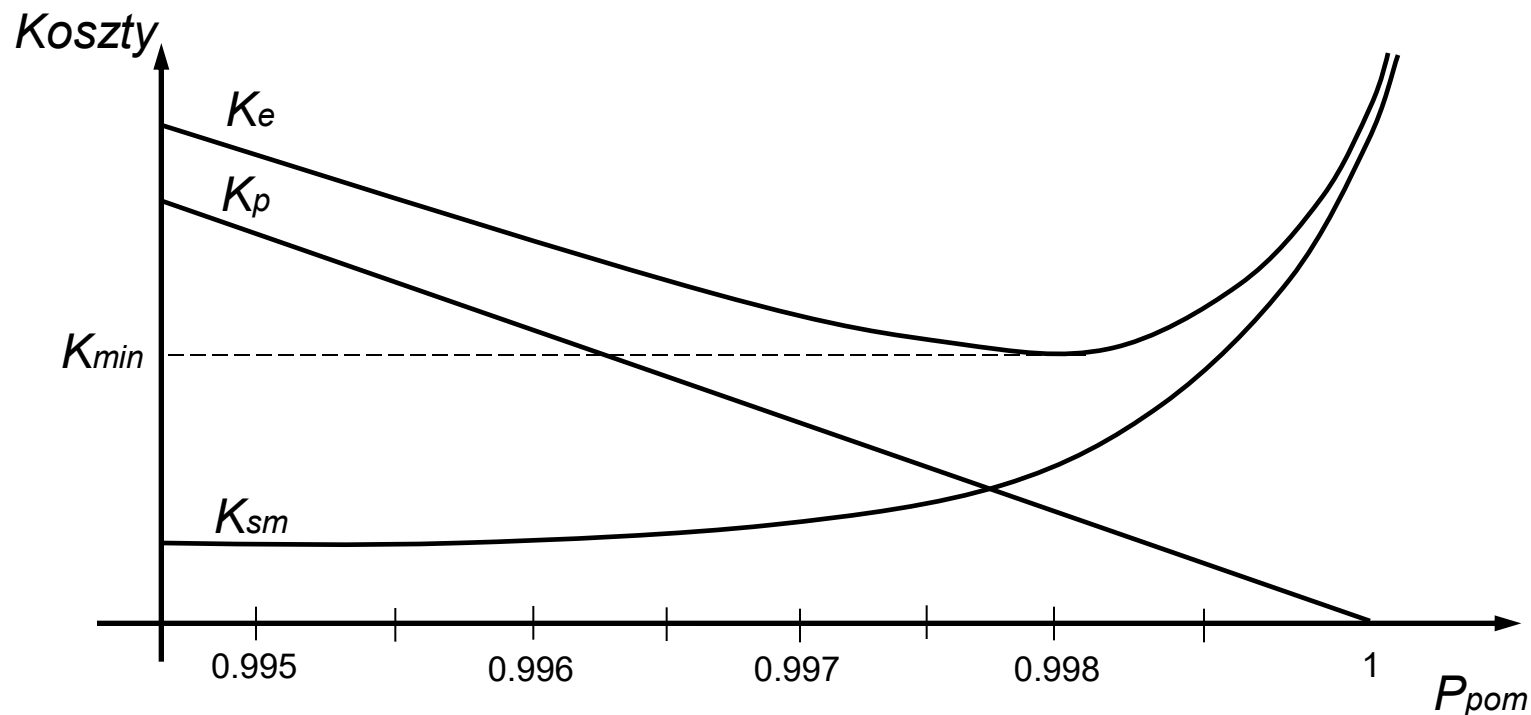
Na koszty wykonania operacji montażowej (**koszty eksploatacji K_e**) składa się bardzo wiele czynników. Uogólniając jednak można wskazać, że głównymi składnikami tych kosztów są przypadające na nie:

- **koszty stanowiska montażowego K_{sm} ,**
- **koszty wdrażania K_w ,**
- **koszty pracowników (nadzoru technicznego lub serwisu) K_{osob} ,**
- **koszty związane z przestojami K_p .**

$$K_e = K_{sm} + K_w + K_{osob} + K_p$$

Wydajność i niezawodność montażu

Można założyć ponadto, że koszty pracowników i koszty wdrażania są stałe. Zmieniać się mogą wówczas jedynie koszty stanowiska montażowego i koszty przestojów



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki kosztów operacji montażowej w funkcji prawdopodobieństwa; K_e – koszty eksploatacji, K_{pr} – koszty przestojów, K_{sm} – koszty stanowiska montażowego, P_{pom} – prawdopodobieństwo poprawnego wykonania operacji montażowej

Metody montażu

Przez **montowalność** wyrobu należy rozumieć prawdopodobieństwo połączenia wszystkich jego części, przy zachowaniu wymagań jakościowych.

- **Montowalność** wyrobów w warunkach automatyzacji w dużej mierze zależy od dokładności podawanych części. Gdy jest ona zbyt mała, może to doprowadzić do przerw i awarii w pracy urządzeń, a w konsekwencji wpływa na wydajność i ekonomiczną zasadność montażu automatycznego.
- **Podstawowym zadaniem konstruktora i technologa** w czasie projektowania jest ustalenie właściwych **tolerancji wykonania części i połączeń**, które zapewniłyby montowalność wyrobu na automatycznych *UM* i ekonomiczność takiej operacji.

Warunki montowalności

W ogólnym przypadku **warunkami montowalności** nazywamy wartości tolerancji względnego przesunięcia liniowego i skręcenia (obrotu) części w przestrzeni w granicach których możliwe jest połączenie części.

Jeżeli wartości błędów stanowiska montażowego będą mniejsze od dopuszczalnych tzn. wyznaczonych warunkami montowalności, to ich montaż będzie możliwy, jeśli zaś większe - to połączenie będzie niemożliwe.

Warunki montowalności części cylindrycznych

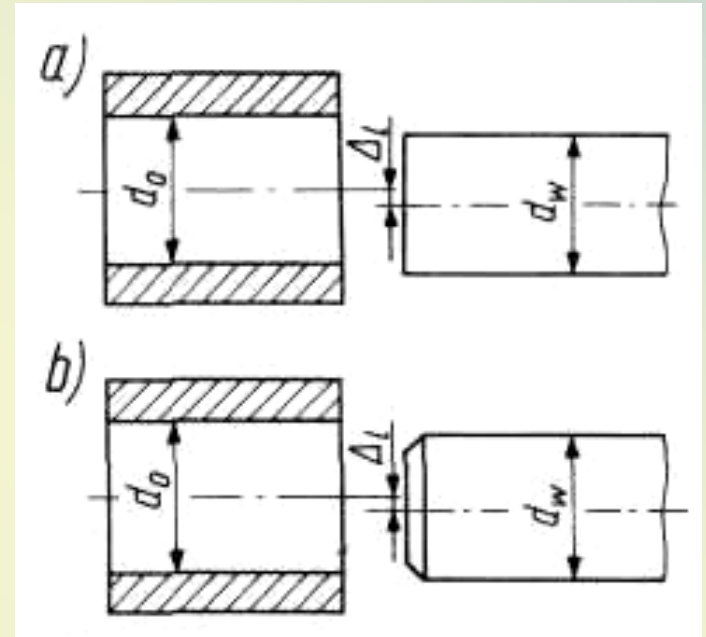
Wartość liniowego przesunięcia części można wyznaczyć jako

$$\Delta l = 0,5(d_o^{\min} - d_w^{\max}) = 0,5T_p$$

gdzie: d_o - średnica otworu, d_w - średnica wałka.

a w przypadku obecności powierzchni przejściowej w postaci fazki o długości C_p

$$\Delta l' = 0,5T_p + C_p$$



Warunki montowalności części cylindrycznych

Dopuszczalne kątowne skręcenie osi łączonych części

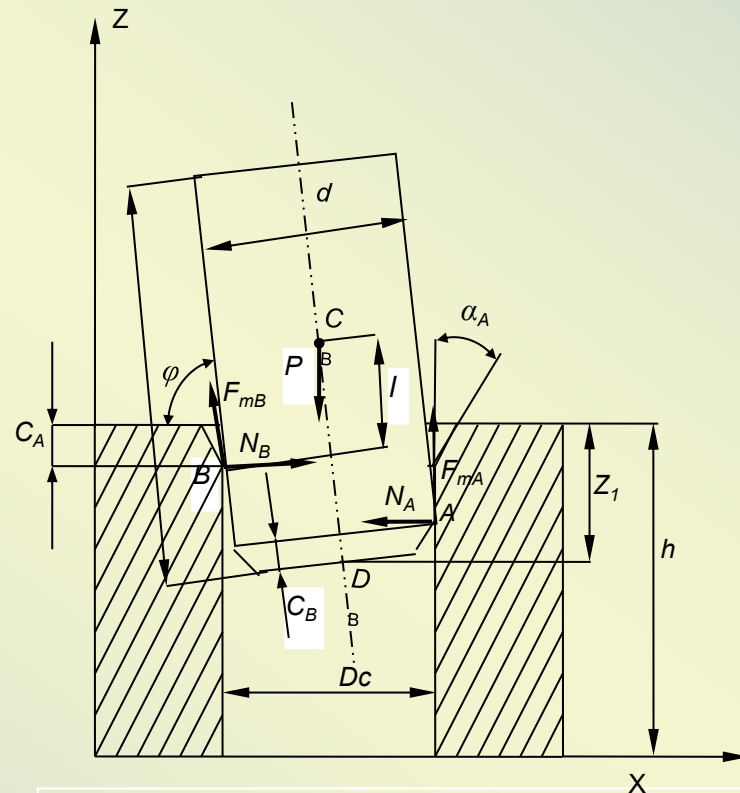
$$\varphi \geq \varphi_{gr}$$

$$Z \geq Z_{gr}$$

$$\frac{\mu_B d - (L - 2C_B) + \mu_A \mu_B L}{2} \cos^2 \varphi_{gr} - \frac{\mu_A d}{2} \sin^2 \varphi_{gr} + \frac{\mu_B d}{2} - dtg \varphi_{gr} +$$

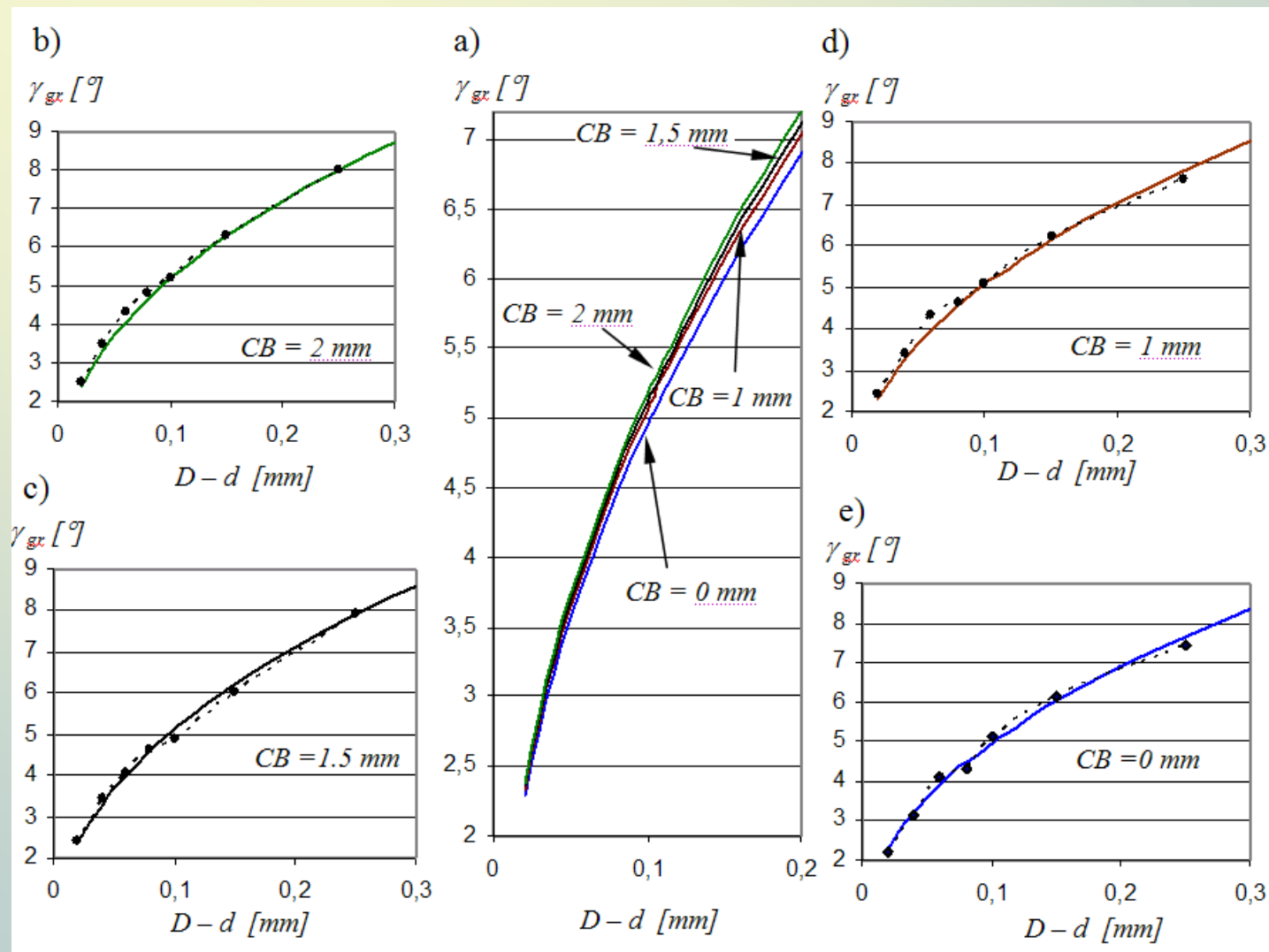
$$+ \frac{D}{\cos \varphi_{gr}} + \frac{\mu_A \mu_B d - (\mu_A + \mu_B)(L - 2C_B) - d}{2} \sin \varphi_{gr} \cos \varphi_{gr} = 0$$

$$Z_{gr} = \frac{D \sin \varphi_{gr} - d}{\cos \varphi_{gr}} + C_A + \frac{d}{2} \cos \varphi_{gr} + C_B \sin \varphi_{gr}$$



Początek pierwszego etapu
montażu wałka i tulejki

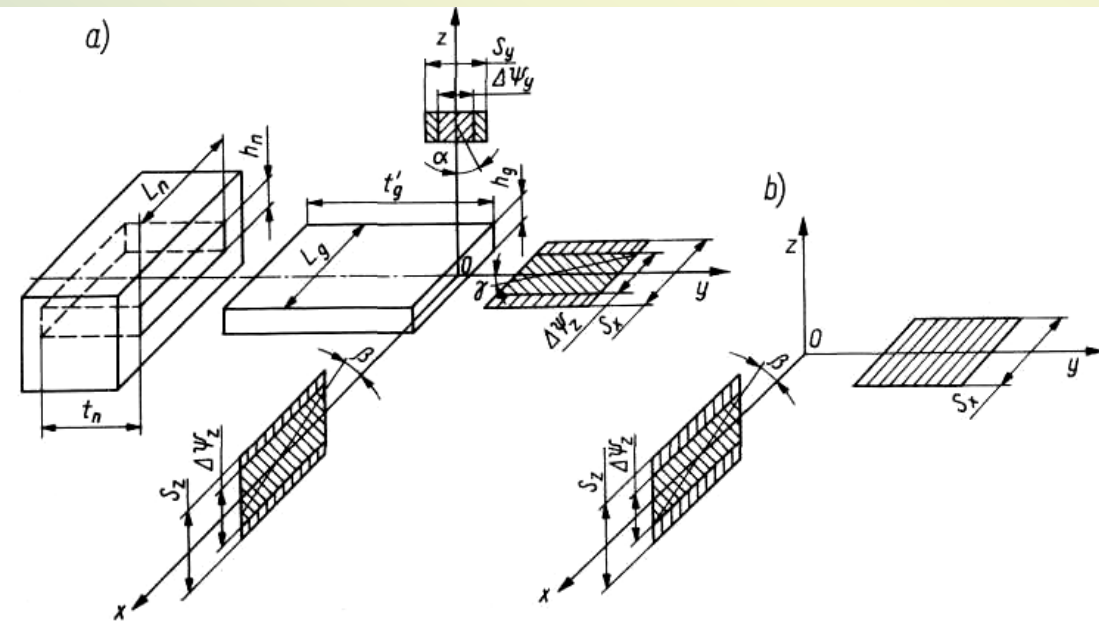
Warunki montowalności części cylindrycznych



Warunki montowalności części o powierzchniach płaskich

W ogólnym przypadku warunek montowalności części o powierzchniach płaskich można przedstawić za pomocą nierówności:

$$\Delta T_x \leq S_x - \Delta \psi_x; \quad \Delta T_y \leq S_y - \Delta \psi_y; \quad \Delta T_z \leq S_z - \Delta \psi_z$$



S_x, S_y, S_z – minimalne luzy w połączeniu wzdłuż osi współrzędnych

$\Delta\psi_x, \Delta\psi_y, \Delta\psi_z$ – uchyby liniowe spowodowane błędami orientacji części α, β, γ

Technologiczność konstrukcji

Technologiczność konstrukcji wyrobu jest to zbiór cech jego konstrukcji sprzyjających minimalizacji nakładów pracy, materiałów, energii i czasu w trakcie technologicznego przygotowania produkcji, wytwarzania, eksploatacji i remontów w określonych warunkach organizacyjno-technicznych przy zachowaniu wskaźników jakościowych.

Należy podkreślić, że konstrukcja technologiczna ze względu na montaż automatyczny może okazać się nietechnologiczna ze względu na wytwarzanie poszczególnych części.

Technologiczność konstrukcji

W czasie montażu automatycznego rozwiązania konstrukcyjne wyrobu i jego elementów składowych determinują:

- łatwość wykonania montażu,
- konstrukcję automatów i półautomatów montażowych,
- konstrukcję specjalnych przyrządów i narzędzi
- niezawodność i stabilność pracy montażowych urządzeń automatycznych

Technologiczność konstrukcji

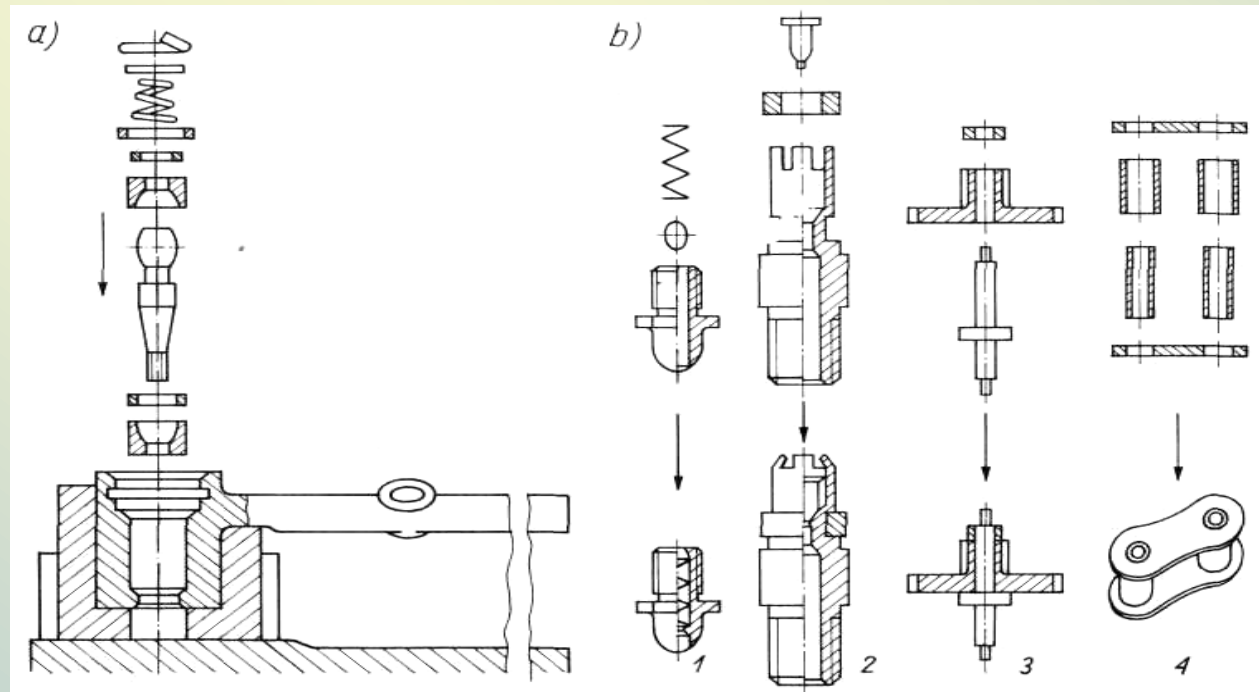
Znaczna pracochołoność prac montażowych, powodowana niewystarczającym stosowaniem środków mechanizacji i automatyzacji, jest skutkiem szeregu przyczyn:

- nietechnologiczności konstrukcji wyrobów,
- niskiego poziomu unifikacji i normalizacji części i zespołów,
- niestabilnej jakości łączonych elementów i zespołów.

Z tych względów jednym z głównych warunków wdrażania kompleksowej mechanizacji i automatyzacji montażu jest odpowiednie przygotowanie wyrobu do tego procesu, tzn. dopracowanie technologiczności ze względu na automatyczny montaż. Ważniejsze z tych wymagań są następujące:

Technologiczność konstrukcji zespołów

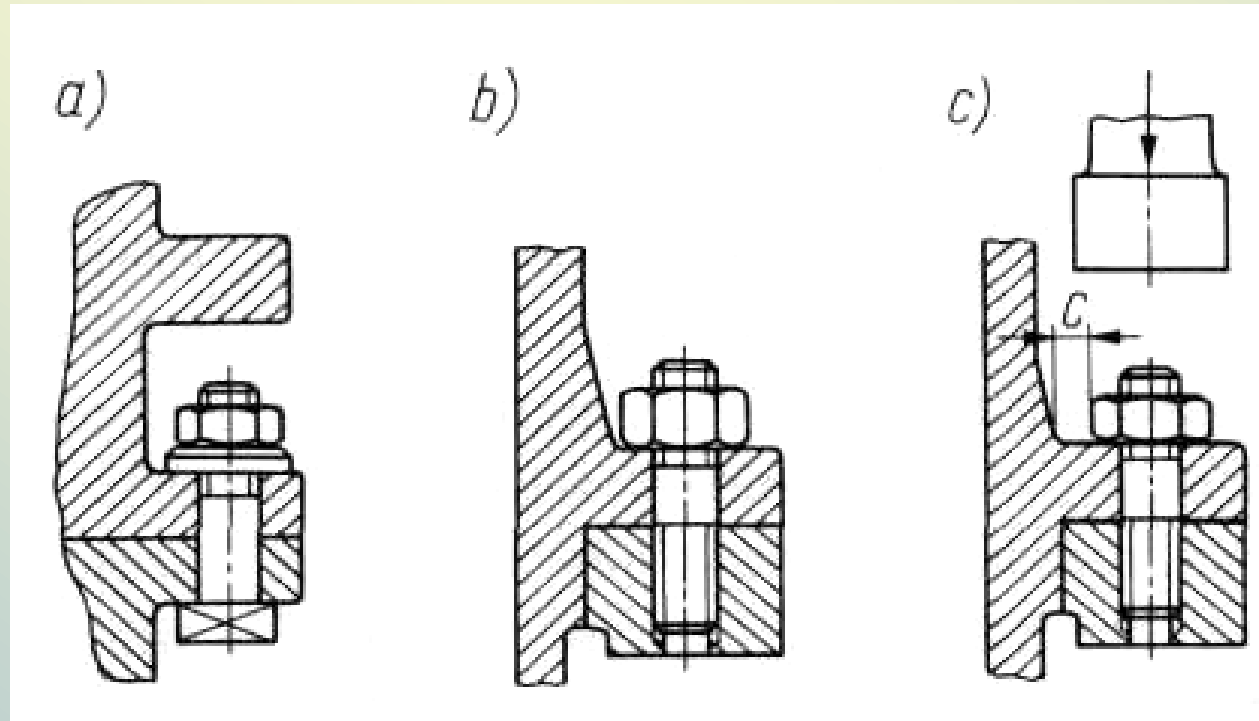
1. Rozwiązanie konstrukcyjne zespołu powinno umożliwiać podawanie części do montażu **po prostych trajektoriach**, gdyż upraszcza to wykonanie organów roboczych automatu montażowego



Rys. 3. Zalecany sposób konstruowania części i zespołów do prostoliniowego montażu automatycznego: a) montaż drążka kierowniczego samochodu, b) przykłady jednostek zbudowanych warstwowo; 1 - smarownica kulkowa, 2 - obsada zaworu, 3 - koło zębate, 4 - ogniwo łańcucha członowego

Technologiczność konstrukcji zespołów

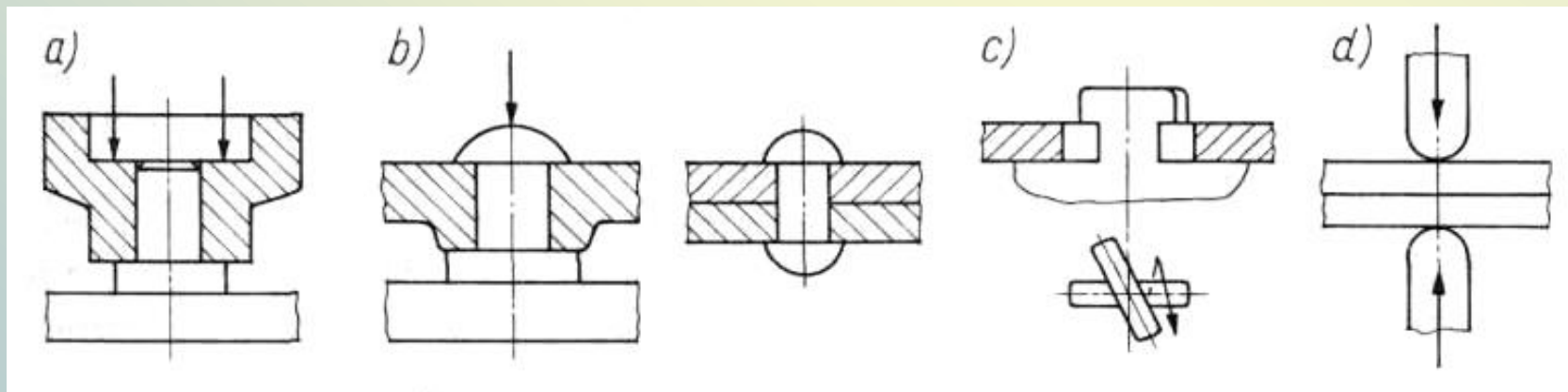
2. Konstrukcja stref łączenia powinna umożliwiać wygodne **dosunięcie i odsunięcie** narzędzi i przyrządów montażowych. Najwygodniej jest je dosuwać po trajektoriach prostoliniowych, umożliwiając stosowanie wielowrzecionowych zespołów wykonawczych (rys. 4).



Rys. 4. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych złącza śrubowego: a), b) niewygodne do montażu automatycznego, c) zalecane (ze względu na dostęp narzędzia)

Technologiczność konstrukcji zespołów

- połączenia wykonane **bez dodatkowego elementu łącznego** (rys. 4a wciskanie) przy ruchu postępowym,
- połączenia wykonane z ruchem postępowym i **jednym dodatkowym elementem** (rys. 4b nitowanie),
- połączenia skręcane - konieczny ruch obrotowy i postępowy (rys. 4c zaczeplanie przez skręcenie),
- połączenia dwóch elementów (zgrzewanie) wykonywane przy ruchu postępowym (rys. 4d zgrzewanie),



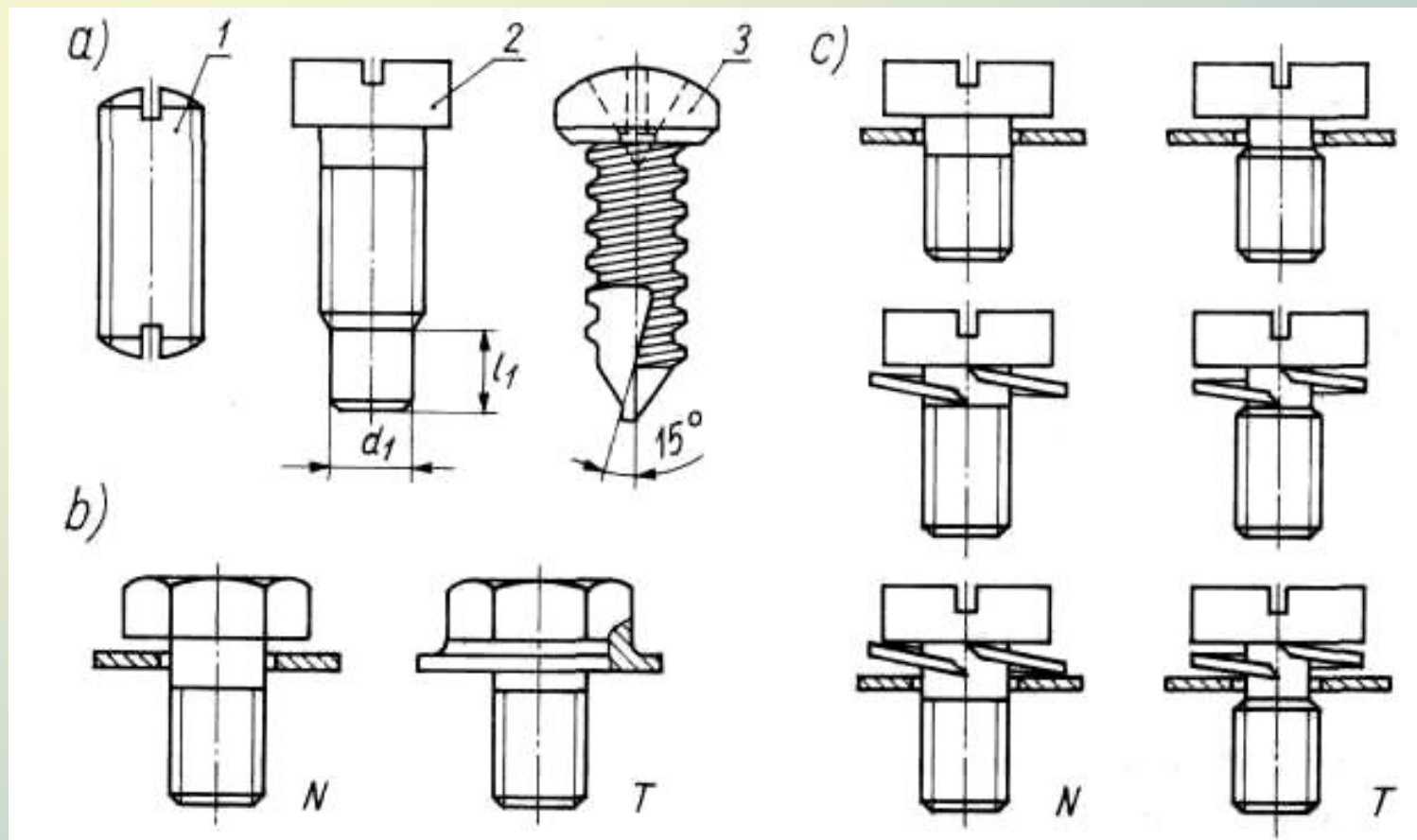
Technologiczność konstrukcji zespołów

3. Montaż powinien być wykonywany **bez zmiany położenia części bazowej**. Najwygodniej jest, gdy elementy montowane i narzędzie są doprowadzane z jednej strony, najlepiej od góry. W warunkach automatyzacji każda zmiana położenia części bazowej komplikuje rozwiązania urządzeń transportowych i pomocniczych.
4. W trakcie montażu automatycznego zespołów z dużą liczbą części należy do montażu **doprowadzać podzespoły częściowo zmontowane**, co upraszcza konstrukcję środków automatyzacji. Bez takiego wstępnego łączenia, w przypadku dużej liczby elementów, urządzenia są wielopozycyjne i wzrasta ich zawodność.

Technologiczność konstrukcji zespołów

5. Znaczne ułatwienie montażu automatycznego uzyskuje się, gdy jest on wykonywany w warunkach **całkowitej zamienności elementów**. Możliwy jest również montaż selekcyjny i kompensacyjny, jednakże powoduje to komplikowanie urządzeń montażowych.
7. Automatyzacja montażu może być znacznie ułatwiona w przypadku zmiany rodzaju połączeń na bardziej odpowiadające wymaganiom automatyzacji, np. montaż złączy śrubowych jest mniej wygodny od nitowanych. Łączenie śruby z nakrętką sprawia spore trudności, łatwiejsze jest wkręcanie śruby w otwór gwintowany, jeszcze wygodniejsze jest stosowanie wkrętów samogwintujących gładki otwór, a nawet elementów wykonujących jednocześnie otwór i gwint (rys. 6).

Technologiczność konstrukcji zespołów

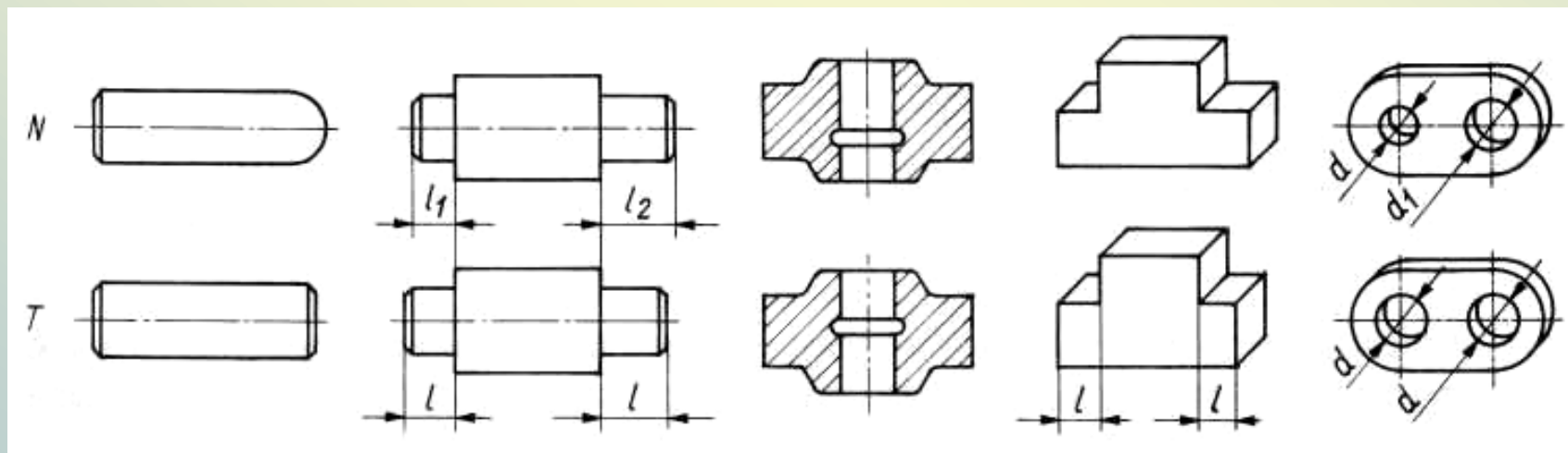


Rys.6. **Nietechnologiczne (N) i technologiczne (T) konstrukcje elementów złącznych**: a) zalecane konstrukcje śrub; 1 - z rowkiem obustronnym, 2 - z czopem prowadzącym, 3 - śruba wykonująca otwór i gwintująca; b), c) nietechnologiczne i technologiczne rozwiązania śrub z podkładkami zwykłymi i sprężystymi (podkładki nasadza się przed nawalcowaniem gwintu zwiększającym średnicę zewnętrzną i zabezpieczającym przed spadaniem podkładek)

Technologiczność konstrukcji części

Części przeznaczone do automatycznego montażu powinny mieć konstrukcję spełniającą pewne wymagania:

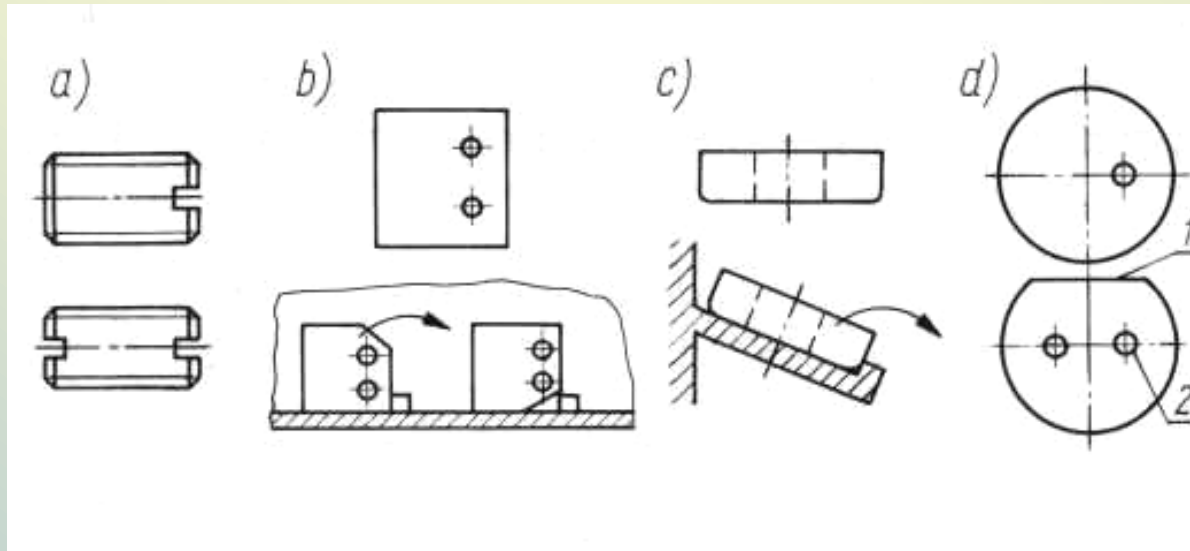
1. Elementy montowane powinny mieć proste i symetryczne kształty, co ułatwi ich orientację na wyjściu z urządzeń wibracyjno-orientujących (rys. 7)



Rys. 7. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych części podlegających automatycznemu orientowaniu: N - nietechnologiczne, T - technologiczne

Technologiczność konstrukcji części

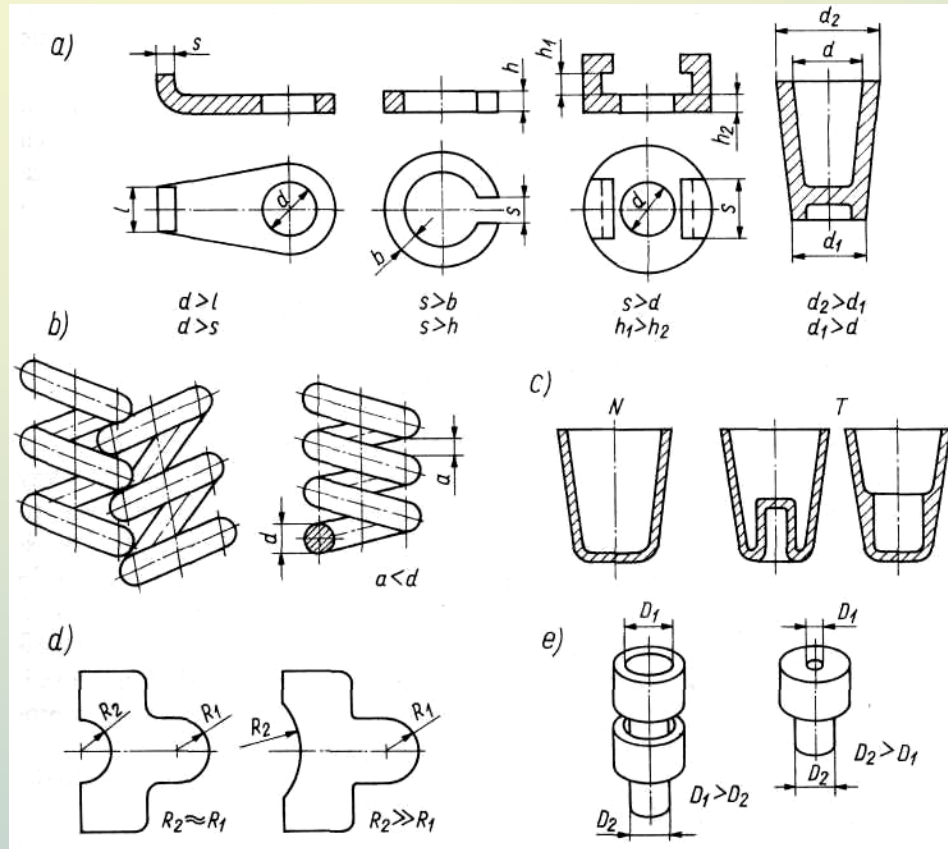
Automatyczne orientowanie staje się trudne lub wręcz niemożliwe, gdy niesymetryczność części przejawia się w mało wyraźnych różnicach budowy zewnętrznej (np. otwory małe lub podobne, stopnie wałka z małą różnicą wymiarów lub tylko z różną dokładnością i chropowatością itp.). Konstrukcję takich części zmienia się wprowadzając występy, ścięcia (i), dodatkowe otwory (2) itp., co jednak zwiększa pracochłonność obróbki mechanicznej (rys. 9).



Rys. 9. Przykłady zmian w konstrukcji części ułatwiających jej orientowanie: a) dodatkowy rowek, b) skośne ścięcie, c) zamiana promienia na fazkę, d) ścięcie i otwór (w celu zapewnienia symetryczności)

Technologiczność konstrukcji części

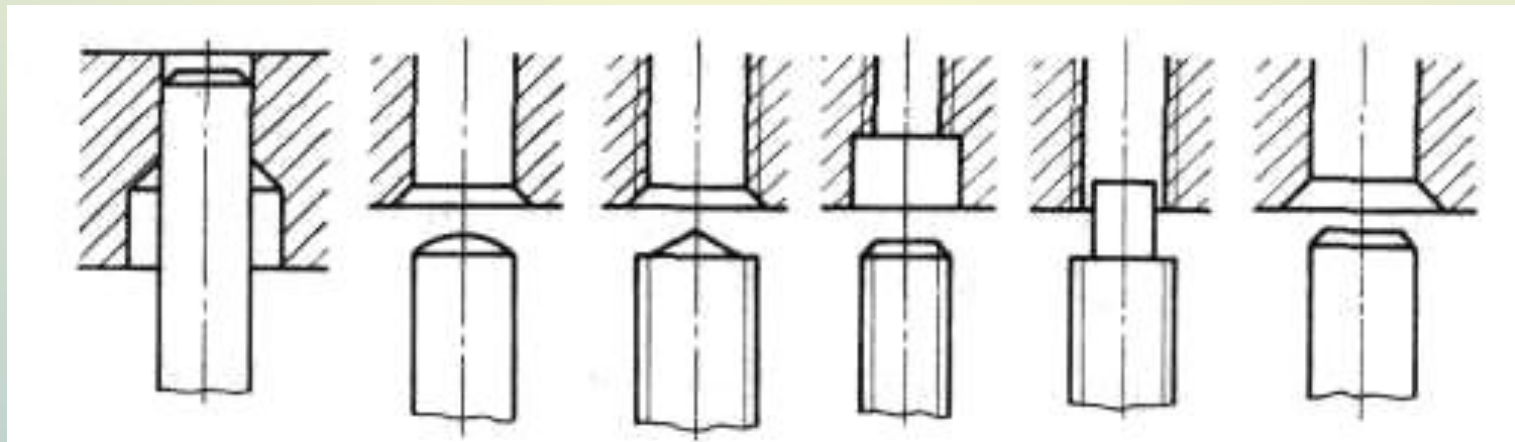
2. Kształt konstrukcyjny części powinien być taki, aby na wyjściu z urządzeń magazynowo-podających nie następowało wzajemne szepianie mogące blokować ich przemieszczanie.



Rys. 4.10. Przykłady konstrukcji części, w których może wystąpić szepianie: a) zasady wymiarowania, b) konstrukcje sprężyn, c) kołpak, d) płytka, e) tulejka; T - technologiczne, N - nietechnologiczne

Technologiczność konstrukcji części

3. Części łączone z wciskiem lub luzem powinny mieć **fazki i strefy prowadzące na obu montowanych częściach**, co ułatwia ich wzajemne właściwe usytuowanie na początku procesu złączania. Ostre krawędzie należy zaokrąglić (rys. 11). Zaleca się wykonywanie fazek o kącie 45° i długości 2-4 mm (w zakresie średnic 18- 50 mm).



Rys. 11. Przykłady rozwiązań stref łączenia elementów współosiowych

Technologiczność konstrukcji części

4. Należy dążyć do wykorzystywania i stosowania części w maksymalnym stopniu **znormalizowanych, zunifikowanych** lub chociażby posiadających strefy o charakterystykach znormalizowanych (wymiary, kształty). Umożliwia to wprowadzanie normalizacji i typizacji do stosowanych organów wykonawczych automatów montażowych, które mogą być ponownie wykorzystane po zmianie produkowanego wyrobu.

5. W celu zapewnienia łatwego przemieszczania w urządzeniach podających części **nie powinny mieć ostrych krawędzi, zadziorów, zbyt chropowatych powierzchni**. Powinny być również starannie oczyszczone i suche (zwłaszcza małe, które mogą przywierać do ścianek urządzeń montażowych).

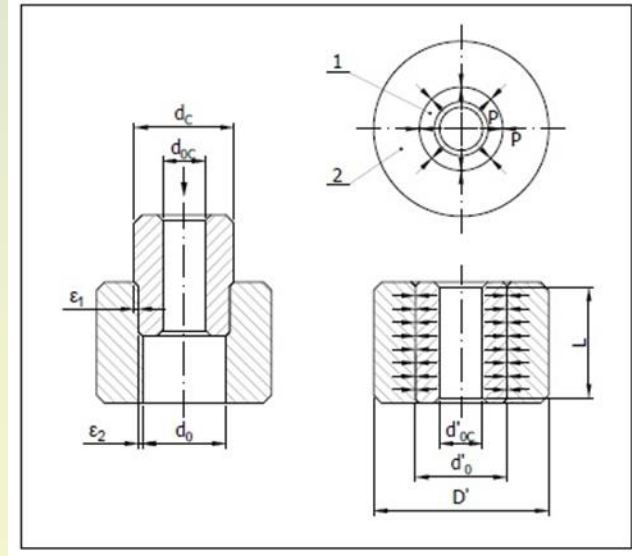
Połączenia czopowo-cierne

Połączeniem bezpośrednim **wciskowym** jest połączenie, w którym wzajemne unieruchomienie łączonych części następuje na skutek tarcia wywołanego przez wcisk. Rozłączeniu połączonych w ten sposób części przeciwdziałają siły sprężystości, wywołane odkształceniem połączonych części. W zależności od technologii montażu połączenie wciskowe dzieli się na:

- ✓ wślaczane, uzyskane przez wtłoczenie jednego elementu w drugi
- ✓ skurczowe, wymagające odpowiedniego zabiegu cieplnego (podgrzania tulei lub oziębienia wału)

Do najistotniejszych zalet połączenia wciskowego bezpośredniego należy:

- łatwe do wykonania walcowe powierzchnie styku
- dokładna współosiowość części łączonych,
- duża obciążalność złącza, szczególnie przy obciążeniach statycznych
- brak elementów dodatkowych



Połączenia czopowo-cierne

Wadami połączenia wciskowego są:

- ❑ znaczne naprężenia montażowe, grożące zniszczeniu części
- ❑ trudność uzyskania żądanego wcisku, zależnego m.in. od uzyskanych wymiarów części, spowodowanych stosunkowo wąskim polem tolerancji przy możliwie małych parametrach chropowatości
- ❑ dość złożony proces montażu
- ❑ możliwość występowania mikropoślizgów na powierzchniach połączenia w wyniku odkształceń w trakcie eksploatacji

Wciskanie w granicach sprężystości stosuje się tylko do materiałów kruchych, a żądane wartości wcisku osiąga się przez dobór selekcyjny z elementów wykonanych w szerszych granicach tolerancji przy wytwarzaniu seryjnym. Przy wciskaniu elementów z materiałów plastycznych dopuszcza się powstanie odkształceń trwałych.

Najczęściej stosuje się pasowania włączane oznaczane H/s lub S/h oraz mocno włączane H/u lub U/h wykonane w 6, 7 lub 8 klasie dokładności. Przy małych średnicach (poniżej 6 mm) dla materiałów ciągliwych: mosiądz, aluminium stosuje się pasowania H/zb lub ZB/h w 9 klasie dokładności.

Połączenia wślaczane

Montaż połączeń wślaczanych walcowych przeprowadzany jest w trzech etapach:

- orientowanie przyłączy,
- wprowadzanie jednego przyłącza w drugie,
- wślaczanie.

Podczas wślaczania czopa do otworu zachodzi potrzeba określenia wartości największej **siły wślaczania Q** , która powoduje wtłoczenie jednego przyłącza w drugie oraz szybkości wślaczania. Siła wślaczania wzrasta od zera do pewnej wartości maksymalnej i określa się z następującej zależności:

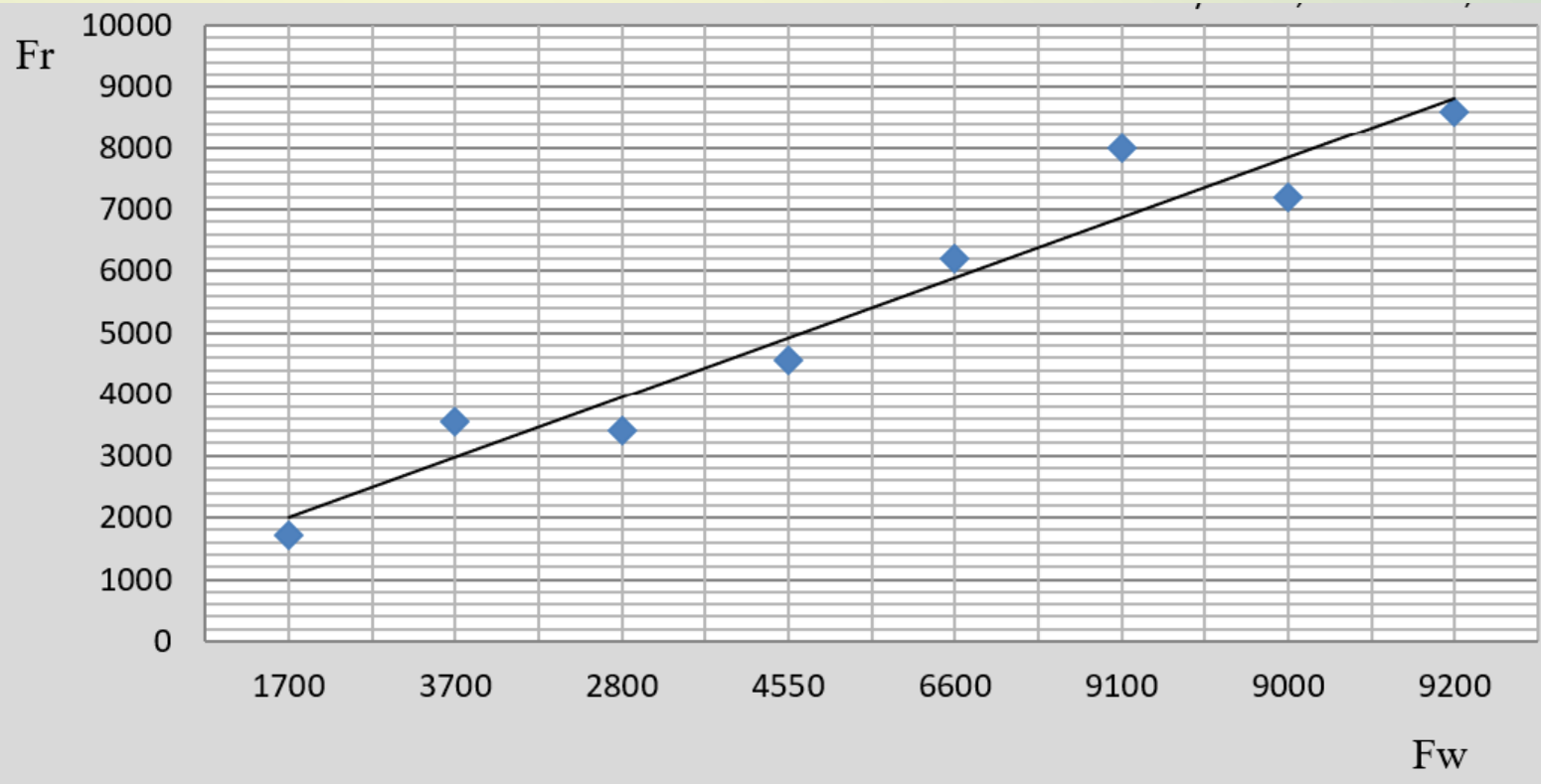
$$Q = \mu_{wt} \pi d L p$$

gdzie: μ_{wt} – współczynnik tarcia przy wślaczaniu; d – średnica otworu oprawy na powierzchni styku; L – długość wślaczania; p – nacisk jednostkowy na powierzchni styku

Dla zabezpieczenia przed zatarciem na powierzchni styku i umożliwienie wielokrotnego łączenia i rozłączania bez osłabienia złącza stosuje się smary płynne tj. olej maszynowy, rzepakowy lub smary stałe np. dwusiarczek molibdenu. Wybór odpowiedniego smaru zależy od materiału przyłączy i warunków w jakich będzie przebiegał proces. Zmniejsza się przez to wartość współczynnika tarcia, a przez to siłę wślaczania.

Połączenia czopowo-cierne

Szybkość wtłaczania – powinna zawierać się w przedziale od 1 do 10 mm/s, jednak największą wytrzymałość połączeń uzyskuje się przy prędkościach mniejszych od 3 mm/s. Jest uzależniona od wydajności procesu oraz od wymaganej wytrzymałości połączenia.



Połączenia skurczowe i rozprężne

Podobnie jak w połączeniach wtłaczanych cechą charakterystyczną połączeń skurczowych i rozprężnych jest wcisk, który uzyskujemy samoczynnie po wyrównaniu temperatury obu przyłączy, z których jedno przed osadzeniem było nagrzane bądź oziębione. W tych połączeniach mikro nierówności nie ulegają wygładzaniu jak przy połączeniach wtłaczanych lecz szczepiają się ze sobą. Z tych względów siła osiowa, która była niezbędna przy montażu połączeń wtłaczanych przy montażu połączeń skurczowych i rozprężnych staje zbędna

Temperatura nagrzewania lub ochłodzenia przyłączy jest najważniejszą czynnością występującą podczas projektowania procesu połączeń skurczowych i rozprężnych. Jest niezbędna do zamontowania zespołu, oraz wyboru urządzeń do realizacji tego procesu. Temperaturę do której należy ochłodzić lub podgrzać przyłącze , można wyznaczyć rachunkowo stosując wzór:

$$T_{n(o)} = \frac{W + \gamma}{10^3 \alpha d}$$

gdzie: T_o lub T_n – temperatury nagrzewania lub ochładzania; W – wymagany wcisk, w μm ; γ – minimalny luz umożliwiający łatwe łączenie przyłączy, w μm ; d – nominalny wymiar średnicy otworu oprawy przy nagrzewaniu czopa lub przy jego ochładzaniu, w mm; α – współczynnik rozszerzalności liniowej przyłącza ochładzanego lub ogrzewanego.

Połączenia skurczowe i rozprężne

Istnieją różne sposoby nagrzewania przyłączy. Najczęściej stosowane są piece oporowe z komorami zwykłymi lub też w przypadku zachowania temperatury przyłącza w dość wąskim zakresie – z wannami olejowymi oraz urządzenia indukcyjne.

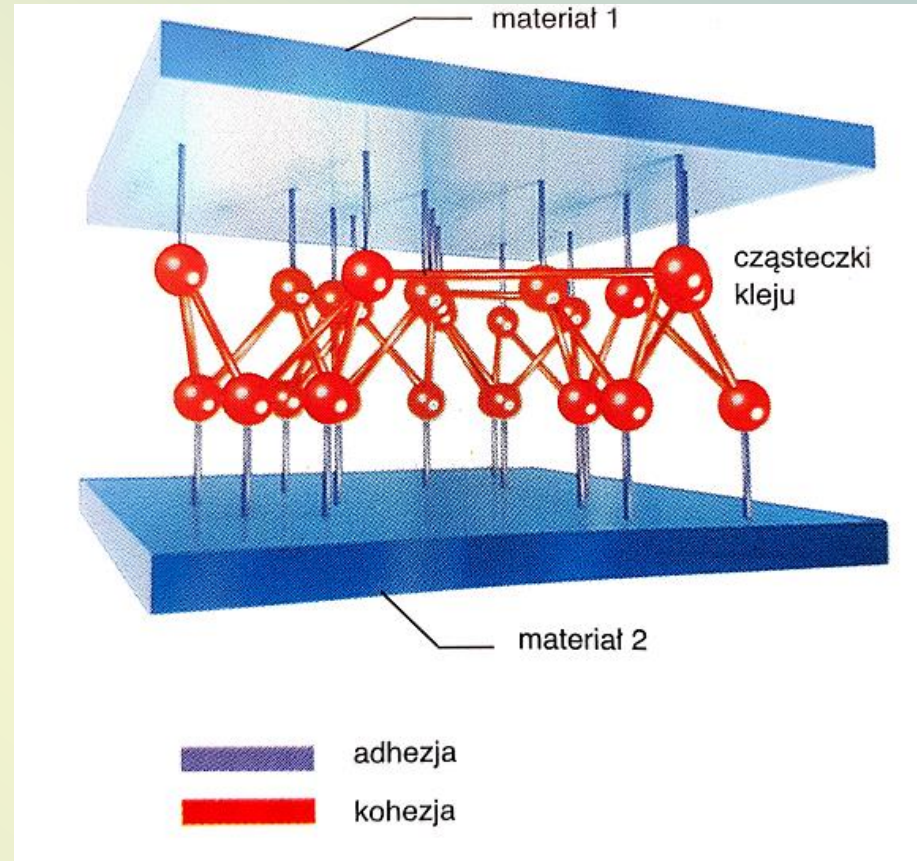
Do nagrzewania większych gabarytowo części stosuje się przenośne spirale grzewcze, natomiast do mniejszych części - piece indukcyjne w kształcie walca. Do ochłodzenia przyłączy należy użyć stałego lub ciekłego dwutlenku węgla (do -78°C), skroplonego tlenu (-182°C), skroplonego azotu (-195°C) oraz skroplonego powietrza (-190°C).

Połączenia skurczowe i rozprężne posiadają wiele zalet w porównaniu do połączeń wtłaczanych, podstawowe z nich to:

- mniejsza obawa uszkodzenia części ponieważ łączone są one z luzem,
- zbędny transport do stacjonarnych pras,
- duża wartość współczynnika tarcia,
- od dwu – do trzykrotnie większa wartość siły rozłączającej takie połączenia

Połączenia klejowe

Klejenie – jest to połączenie materiałów za pomocą substancji klejącej zwanej klejem. Polega ono na rozprowadzeniu cienkiej warstwy kleju na uprzednio przygotowanej powierzchni. Klejenie jest nowoczesną technologią łączenia elementów maszyn, urządzeń, przedmiotów. Rozwój tej technologii związany jest z produkcją coraz to nowych klejów, o co raz to lepszych właściwościach oraz z rozwojem badań wyjaśniających właściwości klejów i połączeń klejonych



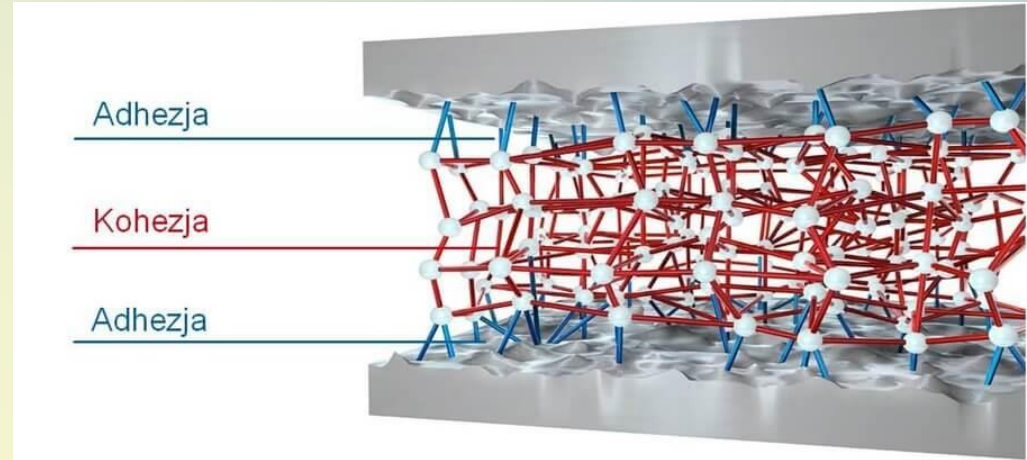
Wytrzymałość połączeń sklejonych jest zależna od:

- ✓ siły kohezji materiału przyłączy – tj. siła, która wpływa na wytrzymałość materiału;
- ✓ siły kohezji utwardzonego kleju – tj. siła, która wpływa na wytrzymałość spoiny;
- ✓ siły adhezji – tj. siła przyczepności pomiędzy łączonymi przyłączami a klejem. Adhezja dotyczy wyłącznie fizycznych oddziaływań powierzchniowych pomiędzy cząsteczkami obu stykających się materii

Połączenia klejowe

Adhezja zależy od:

- Chropowatości powierzchni
- Zanieczyszczenia powierzchni
- Zwilżalności powierzchni

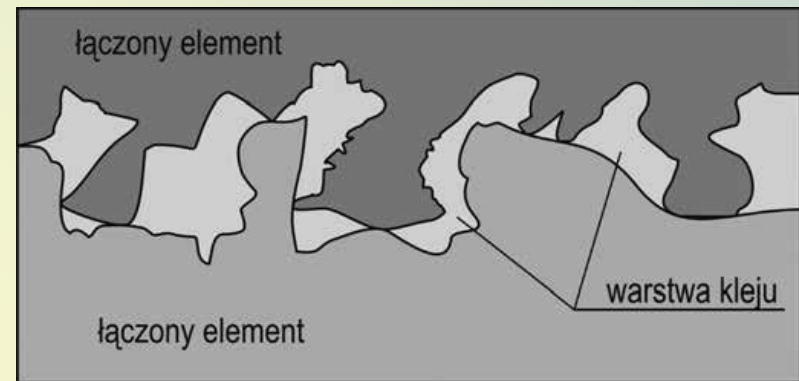


Wpływ na zwiększenie wytrzymałości połączeń adhezyjnych w mechanicznej teorii adhezji mają różne czynniki. Jednym z nich jest to, że wraz ze zwiększaniem chropowatości powierzchni danego materiału, zwiększa się liczba jego wgłębień o nieregularnych kształtach, do których może wnikać klej. Wynika z tego, że wytrzymałość połączeń adhezyjnych materiałów o większej chropowatości powierzchni jest większa niż w przypadku materiałów o mniejszej chropowatości, z uwagi na większą powierzchnię kontaktu z klejem. W celu zapewnienia wymaganej chropowatości powierzchni stosuje się:

- obróbkę narzędziami ściernymi nasypowymi,
- obróbkę strumieniowo-ścierną,
- piaskowanie,
- śrutowanie,
- kulkowanie,
- szczotkowanie,
- skrobanie,
- szlifowanie

Połączenia klejowe

Zbyt duża liczba wąskich porów jest jednak przeszkodą w ich wypełnieniu przez klej, zwłaszcza przez klej o dużej lepkości i znacznym napięciu powierzchniowym. Osadza się on wówczas głównie na wierzchołkach nierówności. W głębi nich znajdują się zamknięte pęcherzyki powietrza, które tworzą tzw. **warstewkę graniczną**, osłabiającą połączenie adhezyjne. Tak więc istnieje pewien stopień schropowacenia, przekroczenie którego stwarza niekorzystne warunki oddziaływania międzycząsteczkowego pomiędzy klejem a podłożem.



Połączenia klejowe

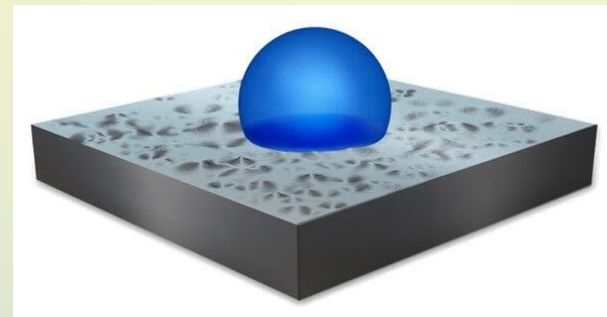
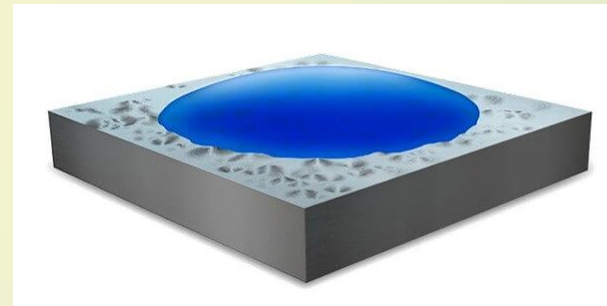
Zanieczyszczenie powierzchni klejonej

Podstawową czynnością przed klejeniem jest wyczyszczenie i odtłuszczenie powierzchni, aby pozbyć się brudu, tłuszczu, pozostałości po olejach obróbczych czy w przypadku tworzyw sztucznych pozostałości po środkach antyadhezyjnych używanych przy produkcji. Do tego celu najlepiej użyć dedykowanych preparatów oraz czyściw, które nie pozostawiają włókien i usprawniają cały proces. Przy odtłuszczaniu tworzyw sztucznych szczególnie ważne jest użycie preparatów, które nie uszkodzą odtłuszczanej powierzchni. Jest nim np. Loctite 7063, który jest neutralny dla tworzyw sztucznych. Nie powinno się używać do tego celu acetonu

Zwilżalność powierzchni

Jest miernikiem przylegania kleju do danego materiału. Do zwiększania napięcia powierzchniowego możemy używać:

- koronowania powierzchni,
- wytrawiania



Połączenia klejowe

Odpowiednie **przygotowanie powierzchni materiałów** jest istotnym warunkiem uzyskania połączeń klejowych o założonych właściwościach. W wyniku przygotowania powierzchni powinno wystąpić działanie wszystkich mechanizmów wiążących, zarówno natury fizycznej, w tym typowo mechanicznej, jak i chemicznej. Ten etap technologii klejenia powinien zapewnić uzyskanie jak najsilniejszych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym. W tym celu należy:

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



Połączenia klejowe

Wytrzymałość połączeń zlepionych zależy przede wszystkim od właściwości klejonych przyłączy materiałów, zastosowanych klejów, warunków wykonania oraz od konstrukcji złącza i rodzaju obciążenia. Wytrzymałość statyczna na ścinanie R_t dla klejów najczęściej używanych zmienia się w zakresie: dla klejów sklejanych na zimno $10 \div 30$ Mpa (100-300 kG/cm²) oraz od $20 \div 30$ Mpa (200-600 kG/cm²) dla klejów łączonych na gorąco.

Wytrzymałość połączenia sklejonego jest znacznie większa na ścinanie niż wytrzymałość na rozciąganie i rozwarstwienie. Z tego względu połączenia klejowe trzeba tak konstruować, aby były narażane na ścinanie oraz zabezpieczone przed rozwarstwieniem.

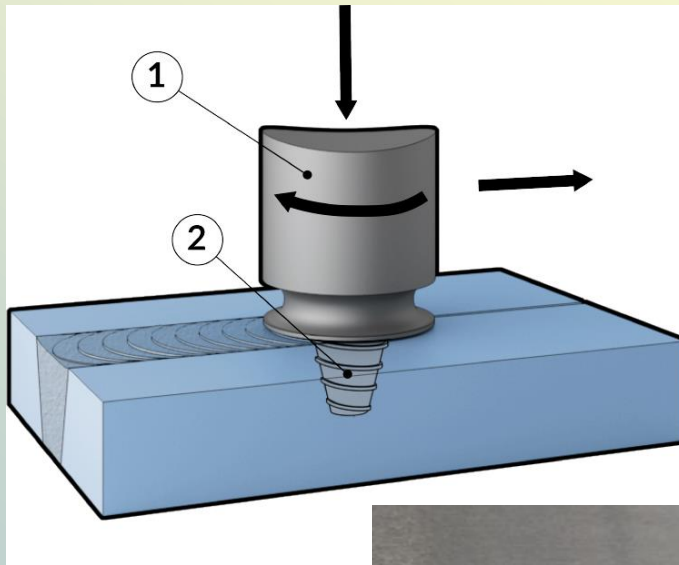
Połączenia sklejane posiadają wiele zalet, do najważniejszych zaliczamy:

- duża wytrzymałość zmęczeniowa – znacznie większa niż wytrzymałość połączeń spawanych i nitowych (wynika z braku koncentracji naprężeń, powstałych np. przy spawaniu lub nitowaniu,
- lepsze tłumienie drgań od połączeń uzyskanych w inny sposób,
- szczelność połączenia,
- możliwość zlepiania różnych metali, nawet takich, które są bardzo odległe od siebie w szeregu napięciowym (bez możliwości wystąpienia elektromechanicznej korozji przyłączy),
- tańsze, prostsze i bardziej uniwersalne oprzyrządowanie oraz mniejsza pracochłonność w porównaniu z innymi procesami.

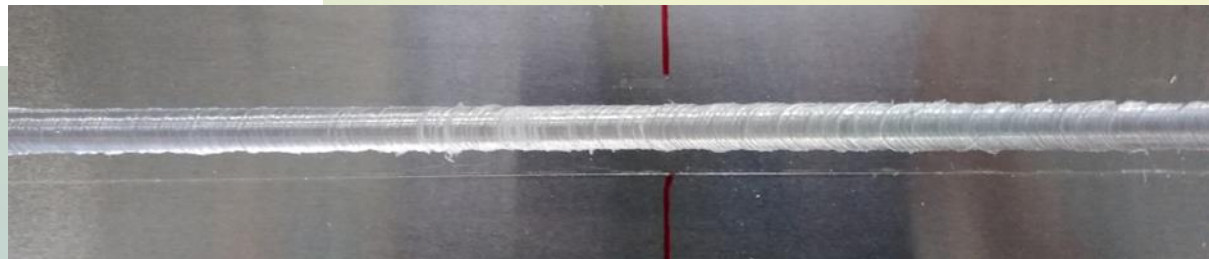
Połączenia te jak i inne mają również wady, główna z nich to mała odporność w wyższych temperaturach (powyżej 300°C lub 573K), trudności z znalezieniem miejsc nie zlepionych a także dość szybkie starzenie się kleju, które powoduje zmianę właściwości połączenia

Połączenia zgrzewane FSW

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem FSW (ang. Friction Stir Welding) jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym (w temperaturach niższych od temperatury topnienia łączzonego materiału). Jest szczególnie przydatna do łączenia materiałów, które w rozumieniu tradycyjnych technologii są trudno spawalne, jak na przykład stale i wysoko wytrzymałe stopy aluminium, miedzi i tytanu, a także niektóre stopy niklu, cyrkonu i miedzi



Istota zgrzewania tarciovego z przemieszaniem polega na wprowadzeniu wirującego cylindrycznego narzędzia w obszar styku łączonych elementów i przemieszczania go wzdłuż linii złącza. W wyniku wydzielanego ciepła tarcia uplastycznione materiały tworzą mechaniczno-plastyczne połączenie.



Połączenia zgrzewane FSW

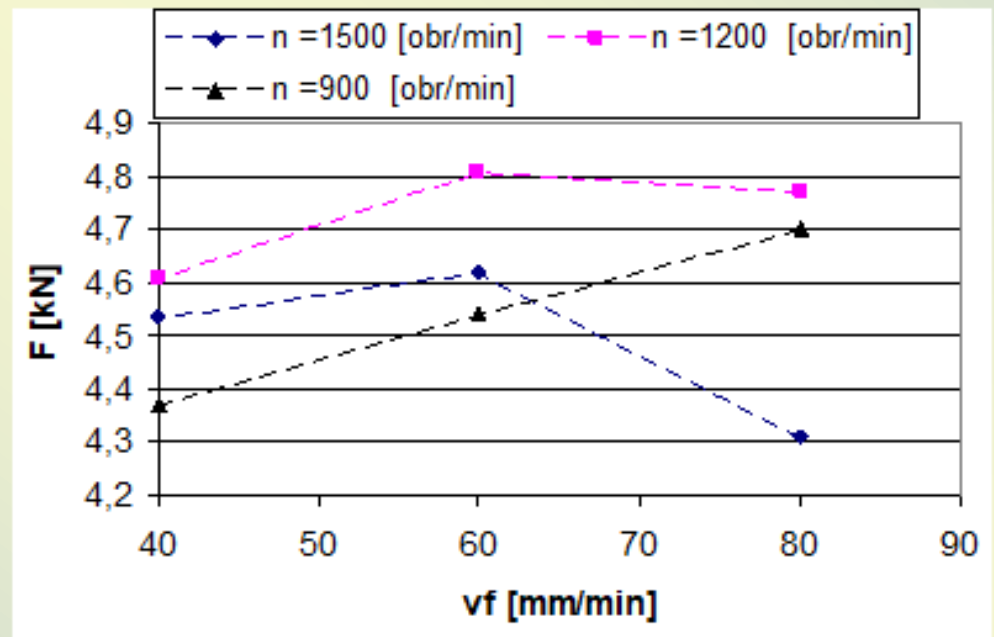
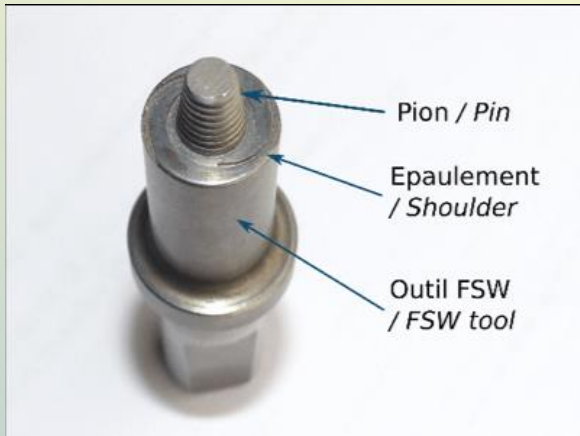
Zalety procesu:

- ✓ eliminacja konieczności ukosowania blach,
- ✓ wyższa odporność złącza na kruche pękanie niż rodzime materiały łączone,
- ✓ wysokie statyczne i dynamiczne właściwości wytrzymałościowe, wyższe od osiąganym konwencjonalnymi metodami,
- ✓ możliwość realizacji procesu na obrabiarkach konwencjonalnych,
- ✓ proste oprzyrządowanie technologiczne,
- ✓ nieprzegrzewanie stref wpływu ciepła, a zatem ich nieosłabianie efektami zmiękczenia,
- ✓ brak tzw. pęknięć gorących mogących powstać w wyniku spawania

Połączenia zgrzewane FSW

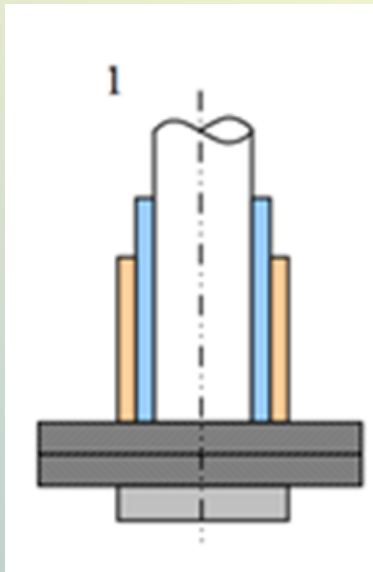
Parametry procesu:

- geometria i prędkość obrotowa narzędzia,
- prędkość posuwu,
- kąt pochylenia narzędzia,
- siła nacisku głębokość zagłębienia czoła narzędzia



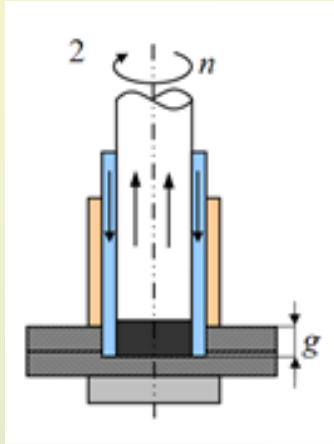
Połączenia zgrzewane RFSSW

W przemyśle motoryzacyjnym trudności w wykonywaniu wykonaniu wysokiej jakości spoin metodami klasycznymi zostały częściowo przezwyciężone w nowej technice łączenia – punktowym zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem (FSSW – Friction Stir Spot Welding). Metoda ta polega na miejscowym (punktowym) nagrzeniu tarcim obszaru złącza przez obrotowe narzędzie. Proces zgrzewania blach metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych faz.

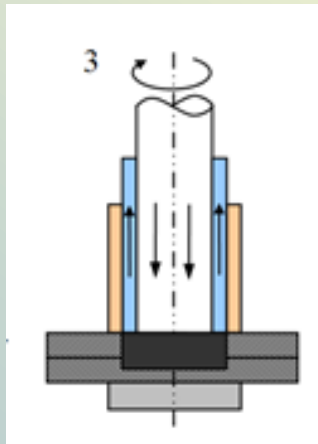


W pierwszej fazie następuje pozycjonowanie trzpienia mieszającego i tulei na płaszczyźnie górnej blachy złącza. Tuleja zewnętrzna wywiera ciągły docisk, zabezpieczając materiały łączone przed niekontrolowanym przesunięciem. Następnie sworzeń i tuleja są przyśpieszane do swojej nominalnej prędkości obrotowej. Jednoczesny obrót i docisk trzpienia i tulei wewnętrznej generuje ciepło tarcia, które nagrzewa i uplastycznia metal w strefie łączenia.

Połączenia zgrzewane RFSSW



Faza druga obejmuje penetrację złącza przez tuleję, która zagłębiając się w materiał powoduje jego uplastycznienie. W tym samym czasie, trzcienie jest wycofany zapewniając przestrzeń dla przemieszczanego materiału



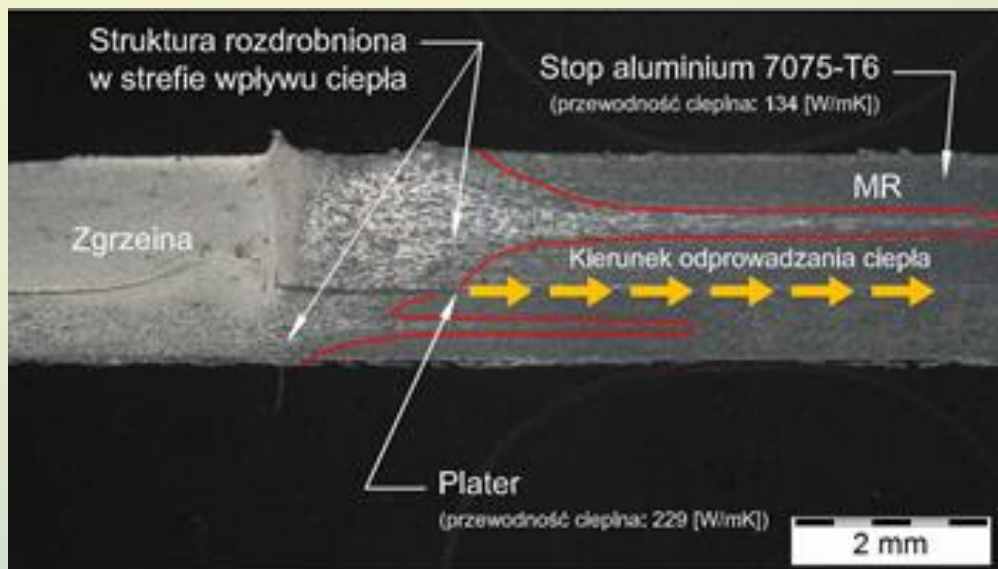
W dalszej fazie następuje przeciwbieżny ruch trzpienia i tulei, który wyciska uplastyczniony metal w kierunku złącza. W końcowej części procesu tuleja i trzcienie ustawiane są w pierwotnej pozycji, po czym następuje odsunięcie narzędzia od spoiny.

Połączenia zgrzewane RFSSW

Zgrzewanie punktowe obecnie wypiera nitowanie i klejenie stopów lekkich ze względu na swoje liczne zalety takie jak:

- nie wymaga nawiercania elementów i stosowania nitów jako dodatkowych elementów łącznikowych,
- nośność zgrzein może osiągać wartości wyższe od połączenia nitowego,
- złącza zgrzewane zachowują wysoką odporność korozyjną ze względu na nieobecność elementów o innym od materiałów rodzimych potencjale elektrochemicznym,
- istnieje możliwość prostej naprawy złącza,
- żaden element zgrzeiny nie wystaje ponad powierzchnie łączonych elementów,
- zostaje wyeliminowana możliwość utraty szczelności przez złącze.

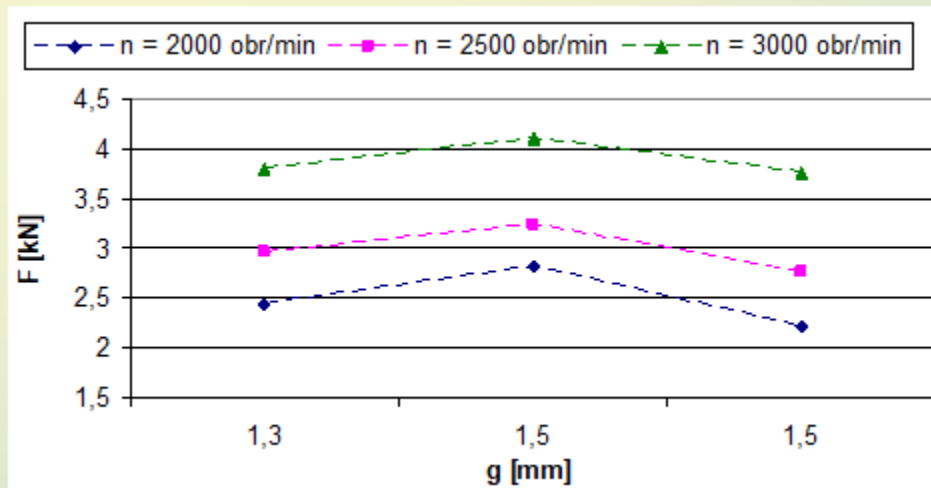
Połączenia zgrzewane RFSSW



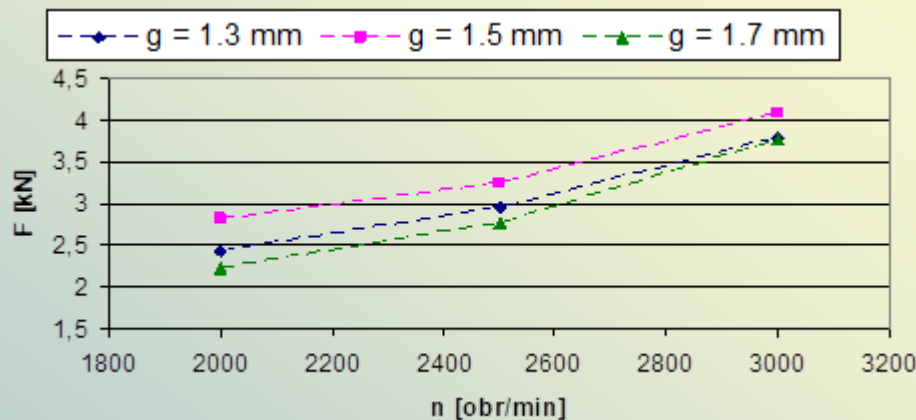
Strefa wpływu ciepła
złączy wykonanych przy
prędkości obrotowej
2800obr/min, głębokości
1.5mm i czasie
zgrzewania a) $x3 = 1.5s$,
b) $x3 = 2.5s$



Połączenia zgrzewane RFSSW

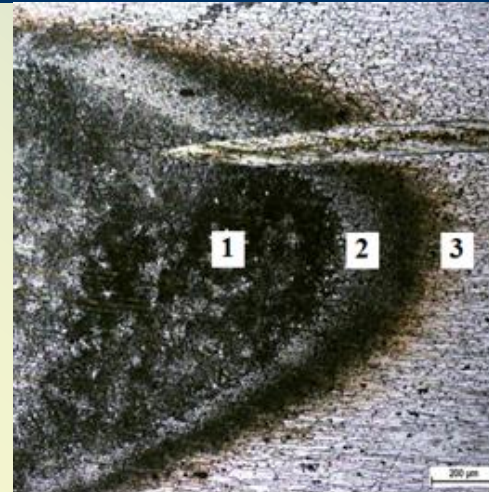
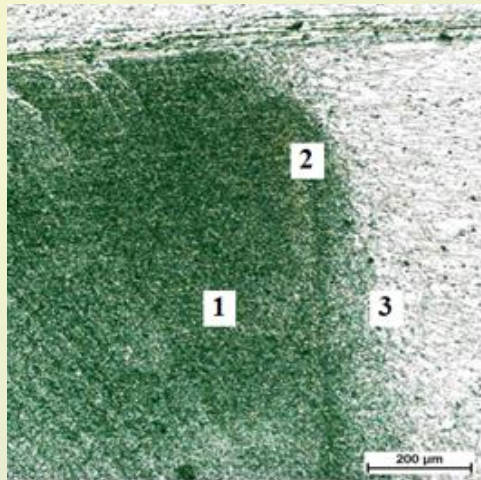


Zależność siły przenoszonej przez złącze od wartości zagłębienia narzędzia



Zależność siły przenoszonej przez złącze od prędkości obrotowej narzędzia

Połączenia zgrzewane RFSSW



Budowa spoiny wykonana metodą: a) RFSSW, b) zgrzewania oporowego

Spoina wykonana metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych części: jądra spoiny (1), strefy rozdziału (2) będącej następstwem pracy tulei narzędzia oraz strefy wpływu ciepła (3) (rys. 8a). Jądro spoiny ma strukturę drobnoziarnistą o lepszych właściwościach mechanicznych w porównaniu do materiału rodzimego.

W spoinie wykonanej metodą zgrzewania oporowego można wyodrębnić trzy zasadnicze części: jądro spoiny (1) mające budowę dendrytyczną, obszar przetopu (2) oraz strefę wpływu ciepła (3). Nierównomierne odprowadzanie ciepła podczas procesu krzepnięcia materiału powoduje że zarodki krystalizacji w obrębie jądra spoiny rozrastają się nierównomiernie i rosną w jednych kierunkach szybciej. Powstająca w ten sposób struktura dendrytyczna charakteryzuje się znacznie gorszymi właściwościami mechanicznym w porównaniu do struktury uzyskiwanej metodą zgrzewania tarcowego