

WYZNACZENIE STANU NAPRĘŻENIA
W OSIOWO-SYMETRYCZNYM POŁĄCZENIU KLEJONYM OBCIĄŻONYM
MOMENTEM SKRĘCAJĄCYM

KAROL GRUDZIŃSKI, TADEUSZ BURDA, LEON ŁABUĆ (SZCZECIN)

1. Wstęp

Klejenie metali w skali przemysłowej datuje się od czasów drugiej wojny światowej i zostało zastosowane po raz pierwszy w brytyjskich fabrykach samolotów. W latach powojennych ten sposób łączenia metali znalazł szerokie zastosowanie w przemyśle precyzyjnym, elektrotechnicznym, maszynowym, motoryzacyjnym, raketowym i innych. W miarę wzrostu jakości produkowanych klejów, postępu technologii klejenia i rozwoju prac badawczych, klejenie metali wprowadzane jest do coraz to nowych gałęzi przemysłu. Obecnie stosuje się je nie tylko do łączenia blach i elementów cienkościennych, ale również do grubościennych i odpowiedzialnych złączy konstrukcyjnych, przenoszących znaczne obciążenie.

Liczne badania oraz praktyka wskazują na dużą przydatność i szerokie możliwości zastosowania klejenia do łączenia elementów o powierzchniach walcowych i stożkowych [1 - 15].

Przy odpowiednim zaprojektowaniu i wykonaniu, połączenia takie mogą przenosić znaczne siły osiowe i momenty skręcające, przy pełnym wykorzystaniu własności wytrzymałościowych materiałów łączonych.

Połączenia klejone wykazują szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi połączeniami wciskowymi, wpustowymi i klinowymi. Do istotnych zalet zaliczyć można brak naprężeń wstępnych — montażowych oraz brak działania karbu. W połączeniach wciskowych obciążonych dynamicznie, na skutek okresowo zmiennych sprężystych odkształceń elementów, występują bardzo często lokalnie małe poślizgi stykających się powierzchni. Poślizgi te wywołują tzw. korozję cierną, niszczą powierzchnię styku i zmniejszają z upływem czasu nośność połączenia, a często są również przyczyną występowania pęknięć zmęczeniowych czopa [16]. Zastosowanie klejenia wydaje się również mieć korzystny wpływ na izolację i tłumienie drgań oraz hałasu.

Wprowadzenie klejenia na szerszą skalę do łączenia odpowiedzialnych elementów maszyn uwarunkowane jest nie tylko odpowiednio wysokiej jakości klejami i technologią klejenia. Niezbędne do osiągnięcia tego celu są również racjonalne metody obliczeń wytrzymałościowych. Opracowanie takich metod, musi być oparte na gruntowej znajomości własności mechanicznych klejów oraz szczegółowej analizie naprężeń i odkształceń w elementach łączonych i warstwie kleju.

W dotychczasowej praktyce przy obliczeniach wytrzymałościowych i interpretacji wyników badań doświadczalnych połączeń walcowych i stożkowych, z uwagi na znacznie większą (jeden do dwóch rzędów) wartość modułu sprężystości metalu w porównaniu z klejem, elementy łączone traktuje się często jako ciała sztywne [6, 15]. W pracach [2, 3] na przykładzie połączeń walcowych wykazano, że przyjęcie takiego założenia stanowi zbyt duże uproszczenie zagadnienia i prowadzi do fałszywych wniosków odnośnie pracy połączenia i wytrzymałości kleju.

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest ogólny model osiowo symetrycznego połączenia klejonego, obciążonego momentem skręcającym. W modelu tym elementy łączone oraz warstwę kleju traktuje się jako ciała sprężyste odkształcalne. Celem rozważań jest wyznaczenie równań opisujących przebieg zmienności naprężeń w elementach łączonych i warstwie kleju na długości połączenia. Rozwiązanie szczegółowe wyznaczono dla połączenia stożkowego. W oparciu o wyniki obliczeń numerycznych omówiono wpływ parametrów materiałowych i konstrukcyjnych połączenia na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju.

♦

2. Model połączenia

Model rozważanego połączenia klejonego przedstawiono schematycznie na rys. 1. Przyjęto następujące założenia:

- 1) elementy łączone — zwane dalej umownie walcem i tulejką — są ciałami osiowo-symetrycznymi o przekroju poprzecznym zmieniającym się w sposób ciągły i łagodny na długości połączenia;
- 2) adhezja kleju do metalu wyklucza poślizg na powierzchniach granicznych;
- 3) przekroje poprzeczne po obciążeniu połączenia momentem skręcającym pozostają płaskie (hipoteza płaskich przekrojów), a do wyznaczenia naprężeń i odkształceń łączonych elementów przyjmuje się wzory znane z wytrzymałości materiałów;
- 4) grubość warstwy kleju jest mała i stała na przekroju poprzecznym, może się natomiast zmieniać na długości połączenia;
- 5) naprężenia styczne w warstwie kleju w przekrojach prostopadłych do osi połączenia są małe i pomijalne;
- 6) przy dostatecznie małych odkształceniach klej spełnia prawo Hooke'a dla czystego ścinania [20].

Przekrój poprzeczny połączenia, na którym zaznaczono odkształcenie warstwy kleju oraz przemieszczenia kątowe charakterystycznych punktów przedstawia rys. 2. Z rysunku tego oraz przyjętych założeń wynikają następujące związki geometryczne i statyczne:

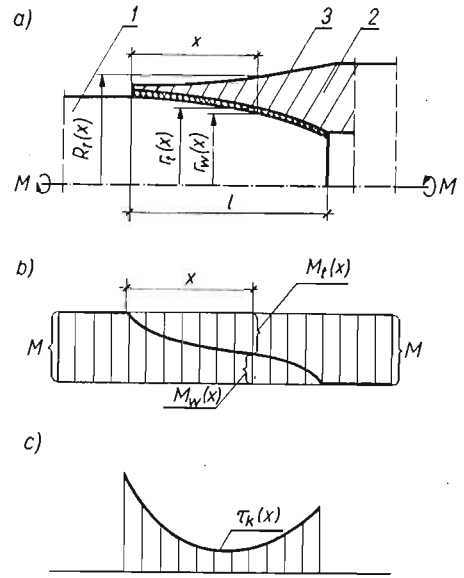
$$(1) \quad \varphi_t(x) + \varphi_k(x) = \varphi_w(x),$$

$$(2) \quad \frac{d\varphi_t}{dx} + \frac{d\varphi_k}{dx} = \frac{d\varphi_w}{dx},$$

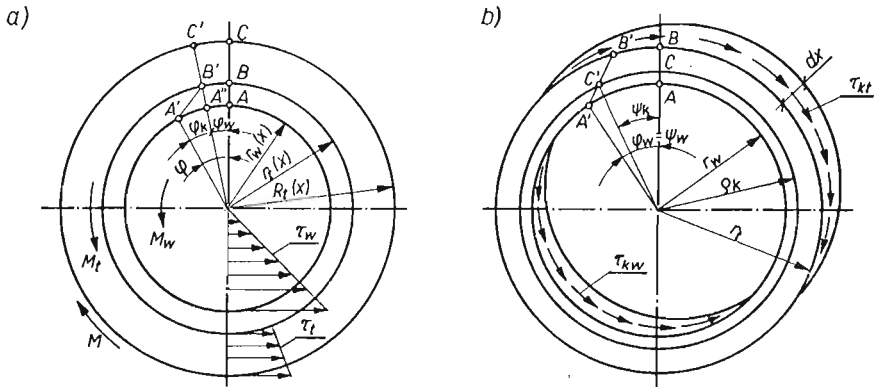
$$(3) \quad M_w(x) + M_t(x) = M,$$

$$(4) \quad \frac{dM_w}{dx} + \frac{dM_t}{dx} = 0,$$

gdzie $\varphi_w(x)$, $\varphi_t(x)$, $\varphi_k(x)$ oznaczają przemieszczenia kątowe wałka, tulejki i kleju w przekroju x (rys. 2a), $M_w(x)$, $M_t(x)$ — momenty skręcające wałek i tulejkę w przekroju x , zaś M — moment skręcający połączenie.



Rys. 1. Osiowo symetryczne połączenie klejone: a) schemat połączenia (1 — wałek, 2 — tulejka, 3 — warstwa kleju); b) orientacyjny wykres momentów skręcających wałek i tulejkę; c) orientacyjny wykres naprężeń stycznych obwodowych w warstwie kleju



Rys. 2. Przemieszczenia kątowe i odkształcenie warstwy kleju w przekroju x połączenia przedstawionego na rys. 1

Z wytrzymałości materiałów znane są wzory na kąt skręcenia wałka i tulejki

$$(5) \quad \frac{d\varphi_w}{dx} = \frac{M_w(x)}{G_w I_{0w}(x)},$$

$$(6) \quad \frac{d\varphi_t}{dx} = \frac{M_t(x)}{G_t I_{0t}(x)},$$

gdzie $I_{0w}(x)$, $I_{0t}(x)$ oznaczają biegunowe momenty bezwładności przekroju wałka i tulejki, zaś G_w , G_t współczynniki sprężystości poprzecznej materiałów wałka i tulejki.

Zmianę momentu na długości dx połączenia określają zależności:

$$(7) \quad \frac{dM_w}{dx} = 2\pi r_w^2(x) \tau_{kw}(x),$$

$$(8) \quad \frac{dM_t}{dx} = 2\pi r_t^2(x) \tau_{kt}(x),$$

gdzie $\tau_{kw}(x)$, $\tau_{kt}(x)$ oznaczają naprężenia styczne obwodowe na powierzchniach granicznych kleju z wałkiem i tulejką (rys. 2b).

Dzieląc stronami (7) i (8) i uwzględniając (4), otrzymuje się dla naprężeń stycznych w warstwach granicznych zależność:

$$(9) \quad |\tau_{kt}(x)| = \left| \frac{r_w^2(x)}{r_t^2(x)} \tau_{kw}(x) \right|.$$

Z nierówności $r_w < r_t$ wynika, że $\tau_{kt} < \tau_{kw}$. Naprężenia styczne na powierzchni walcowej myślowo wyodrębnionego pierścienia kleju (rys. 2b) można wyrazić wzorem [17]:

$$(10) \quad \tau_k = G_k \left(\frac{dv}{d\rho_k} - \frac{v}{\rho_k} \right),$$

gdzie v jest przemieszczeniem (CC') punktów kleju na promieniu ρ_k w kierunku obwodowym. Z rys. 2b wynika zależność:

$$(11) \quad \psi_k = \frac{v}{\rho_k}.$$

Po zrózniczkowaniu (11) i uwzględnieniu (10) otrzymuje się

$$(12) \quad d\psi_k = \frac{\tau_k}{G_k} \frac{d\rho_k}{\rho_k}.$$

Dla małych grubości warstwy kleju można pominąć zmianę wartości naprężeń stycznych i przyjąć, że

$$(13) \quad |\tau_{kw}| \approx |\tau_{kt}| \approx |\tau_k|.$$

Całkując (12) w granicach od r_w do r_t otrzymuje się

$$(14) \quad \varphi_k(x) = \frac{\tau_k(x)}{G_k} \ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)}.$$

Zależność (14) po uwzględnieniu (7) i (13) przyjmuje postać

$$(15) \quad \varphi_k(x) = \left[\frac{1}{2\pi G_k r_w^2(x)} \ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)} \right] \frac{dM_w}{dx}.$$

Różniczkując (15) względem x otrzymuje się

$$(16) \quad \frac{d\varphi_k}{dx} = \frac{1}{2\pi G_k} \left\{ -\frac{1}{r_w^3(x)} \left[1 + 2 \ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)} \right] \frac{dr_w}{dx} + \right. \\ \left. + \frac{1}{r_t(x) r_w^2(x)} \frac{dr_t}{dx} \frac{dM_w}{dx} + \left[\frac{1}{r_w^2(x)} \ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)} \right] \frac{d^2 M_w}{dx^2} \right\}.$$

Na podstawie równania (2), po uwzględnieniu (3), (5), (6) i (16) oraz wprowadzeniu bezwymiarowej funkcji

$$(17) \quad y(x) = \frac{M_w(x)}{M}$$

otrzymuje się równanie

$$(18) \quad y''(x) + b(x)y'(x) + c(x)y(x) = e(x),$$

gdzie

$$(19) \quad b(x) = -\frac{1}{r_w(x)} \left[\frac{1}{\ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)}} + 2 \right] \frac{dr_w}{dx} + \frac{1}{r_t(x) \ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)}} \frac{dr_t}{dx},$$

$$(20) \quad c(x) = -2 \frac{G_k}{G_w} \left[\frac{1}{I_{0w}(x)} + \frac{1}{I_{0t}(x)} \right] \frac{r_w^2(x)}{\ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)}},$$

$$(21) \quad e(x) = -2 \frac{G_k}{G_w} \frac{1}{I_{0t}(x)} \cdot \frac{r_w^2(x)}{\ln \frac{r_t(x)}{r_w(x)}}.$$

Równanie różniczkowe (18) opisuje rozkład momentu skręcającego wałek na długości l osiowo symetrycznego połączenia klejonego przedstawionego na rys. 1. Warunki brzegowe dla funkcji $y(x)$ mają postać

$$(22) \quad y(0) = 1, \quad y(l) = 0.$$

Mając wyznaczoną funkcję $y(x)$ można już łatwo wyznaczyć naprężenia styczne w warstwie kleju. Na podstawie (7), (13) i (17) otrzymuje się

$$(23) \quad \tau_k(x) = \frac{M}{2\pi r_w^2(x)} \frac{dy}{dx}.$$

Współczynniki równania (18) mają skomplikowaną postać. Chcąc rozwiązać równanie (18) należy najpierw określić funkcje występujące we współczynnikach (19) - (21), opisujące geometrię połączenia. W charakterze przykładu rozważone zostanie połączenie stożkowe, które ma szczególnie duże znaczenie praktyczne.

3. Połączenie stożkowe

Schemat połączenia stożkowego pokazano na rys. 3. Średnicę zewnętrzną tulejki na długości l połączenia przyjmuje się jako stałą. Promień czopa i gniazda stożkowego określają zależności (rys. 3):

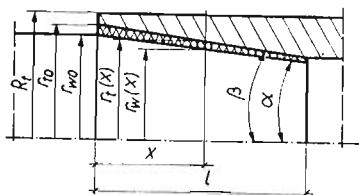
$$(24) \quad r_w(x) = r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha,$$

$$(25) \quad r_t(x) = r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta.$$

Różniczkując (24) i (25) otrzymuje się

$$(26) \quad \frac{dr_w}{dx} = -\operatorname{tg} \alpha,$$

$$(27) \quad \frac{dr_t}{dx} = -\operatorname{tg} \beta.$$



Rys. 3. Schemat połączenia klejonego stożkowego

Biegunowe momenty bezwładności przekrojów wałka i tulejki są równe

$$(28) \quad I_{0w}(x) = \frac{\pi}{2} r_w^4(x) = \frac{\pi}{2} (r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha)^4,$$

$$(29) \quad I_{0t}(x) = \frac{\pi}{2} (R_t^4 - r_t^4(x)) = \frac{\pi}{2} [R_t^4 - (r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta)^4].$$

Po podstawieniu (24) - (29) do (18) - (21) otrzymuje się równanie:

$$(30) \quad y''(x) + \tilde{b}(x)y'(x) + \tilde{c}(x)y(x) = \tilde{e}(x),$$

gdzie

$$(31) \quad \tilde{b}(x) = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha} \left[\frac{1}{\ln \frac{r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta}{r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha}} + 2 \right] - \frac{\operatorname{tg} \beta}{(r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta) \ln \frac{r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta}{r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha}},$$

$$(32) \quad \tilde{c}(x) = \frac{-4}{(r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha)^2 \ln \frac{r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta}{r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha}} \times \left[\frac{(r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha)^4}{R_t^4 - (r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta)^4} \frac{G_k}{G_t} + \frac{G_k}{G_w} \right],$$

$$(33) \quad \tilde{e}(x) = -4 \frac{G_k}{G_w} \frac{(r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha)^2}{[R_t^4 - (r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta)^4] \ln \frac{r_{t0} - x \operatorname{tg} \beta}{r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha}}.$$

Równanie różniczkowe (30) o współczynnikach (31) - (33) opisuje rozkład momentu skręcającego wałek na długości l połączenia stożkowego przedstawionego na rys. 3.

Zależność (23) opisująca rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju po uwzględnieniu (24) przyjmuje postać

$$(34) \quad \tau_k(x) = \frac{M}{2\pi(r_{w0} - x \operatorname{tg} \alpha)^2} \frac{dy}{dx}.$$

Ze względu na złożoną postać wzorów (31) - (33), określających zmienne współczynniki, rozwiązanie równania (30) i badanie wpływu parametrów konstrukcyjnych i materiałowych na stan naprężenia w połączeniu, mogą być wykonane jedynie metodami numerycznymi.

Przyjmując wartości kątów $\alpha = \beta = 0$ (rys. 3) otrzymuje się połączenie walcowe. Dla takiego przypadku równanie (30) przyjmuje prostszą postać

$$(35) \quad y''(x) - \frac{4}{r_{w0}^2 \ln \frac{r_{t0}}{r_{w0}}} \left[\frac{r_w^4}{R_t^4 - R_{t0}^4} \frac{G_k}{G_t} - \frac{G_k}{G_w} \right] y(x) = -4 \frac{G_k}{G_t} \frac{r_{w0}^2}{R_t^4 - r_{t0}^4} \frac{1}{\ln \frac{r_{t0}}{r_{w0}}}.$$

Uwzględniając dla momentów bezwładności przekrojów wałka i tulejki zależności:

$$(36) \quad I_{0w} = \frac{\pi}{2} r_{w0}^4,$$

$$(37) \quad I_{0t} = \frac{\pi}{2} (R_t^4 - r_{t0}^4)$$

i przyjmując dla małej grubości g warstwy kleju

$$(38) \quad \ln \frac{r_{t0}}{r_{w0}} = \ln \left(1 - \frac{g}{r_{w0}} \right) \approx -\frac{g}{r_{w0}},$$

otrzymuje się

$$(39) \quad y''(x) - \frac{4}{gr_{w0}} \left(\frac{G_k}{G_t} \frac{I_{0w}}{I_{0t}} + \frac{G_k}{G_t} \right) y(x) = -\frac{4}{gr_{w0}} \frac{G_k}{G_t} \frac{I_{0w}}{I_{0t}}.$$

Równanie (39) opisuje rozkład momentu skręcającego wałek na długości połączenia walcowego o stałej grubości warstwy kleju.

Naprężenia styczne w warstwie kleju, w oparciu o (34) wyznacza się z zależności

$$(40) \quad \tau_k(x) = \frac{M}{2\pi r_{w0}^2} \frac{dy}{dx}.$$

Równania (39) i (40) wyprowadzone z równań (30) i (34) są identyczne z równaniami otrzymanymi wcześniej, opisanymi w pracach [2, 3]. Połączenie walcowe można traktować jako szczególny przypadek połączenia stożkowego o kącie pochylenia tworzącej $\alpha = \beta = 0$ (rys. 3).

4. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych

Do numerycznego rozwiązania równania różniczkowego (30) wykorzystano metodę różnicową zwyczajną opisaną w pracy [18]. Program obliczeń na maszynie cyfrową ODRA 1204 został napisany w postaci ogólnej i umożliwia wyznaczenie rozkładu i wartości naprężeń stycznych w warstwie kleju na długości l połączenia w funkcji momentu skręcającego M przy uwzględnieniu dowolnych wartości stałych materiałowych (G_w , G_t i G_k) i parametrów konstrukcyjnych (α , β , l , r_{w0} , r_{t0} , R_t), występujących we wzorach (31) - (33), określających współczynniki równania (30). Algorytm, program i szczegółowe wyniki obszernych obliczeń numerycznych oraz ich analizę zawiera praca [19]. Poniżej przedstawiono i omówiono jedynie niewielką część tych wyników.

W celu zbadania wpływu stałych materiałowych elementów łączonych i kleju na stan naprężenia w warstwie kleju, przyjęto jako dane następujące wartości współczynników sprężystości poprzecznej:

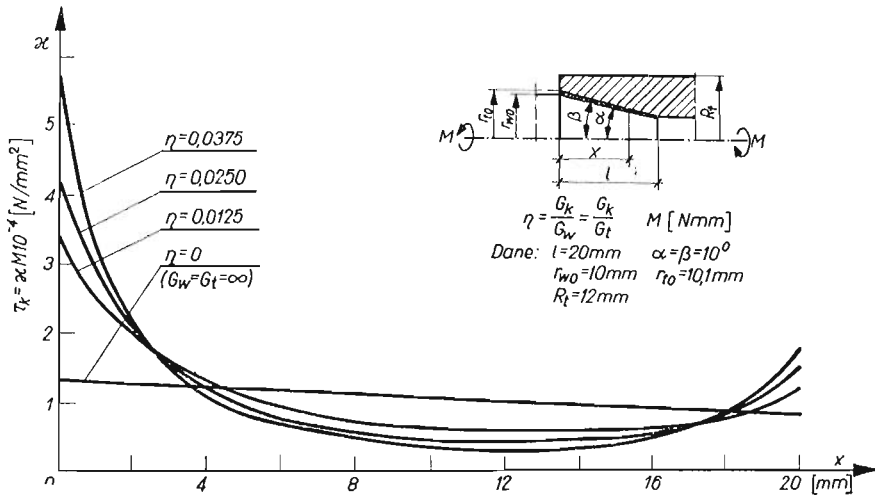
- dla klejów epoksydowych [20] $G_k = 0,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$,
- dla stali $G = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$,
- dla miedzi $G = 4,0 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$,
- dla aluminium i duraluminium $G = 2,7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Z wzorów (31) - (34) wynika, że wpływ na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju mają nie same wartości tych współczynników, lecz ich stosunki G_k/G_w i G_k/G_t . Po odpowiednim podstawieniu powyższych wartości i założeniu, że wałek i tulejka wykonane są z jednego materiału otrzymuje się zakres zmienności stosunku:

$$\frac{G_k}{G_w} = \frac{G_k}{G_t} = 0,0125 \div 0,0371.$$

Dolna wartość odnosi się do elementów złącza wykonanych ze stali, górna — do elementów aluminiowych oraz duraluminiowych.

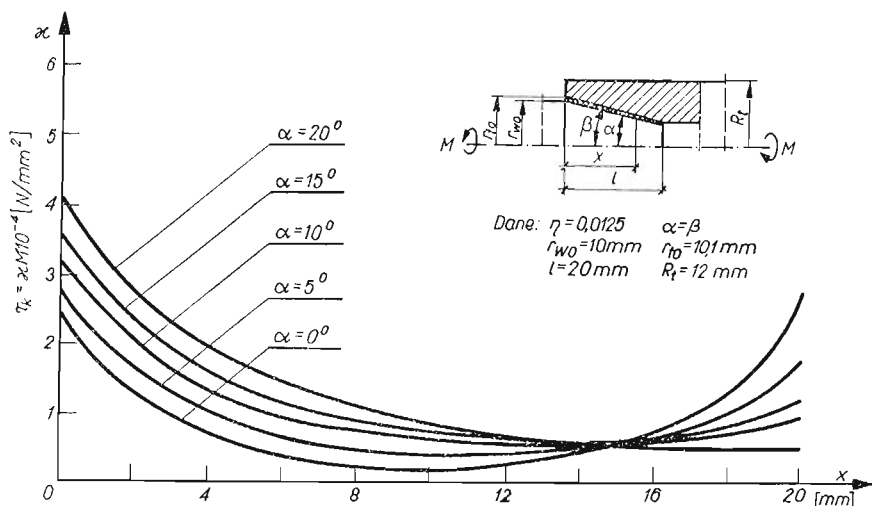
Wpływ stałych materiałowych na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju obrazuje rys. 4. Prosta $\eta = 0$ przedstawia rozkład naprężeń stycznych, przy założeniu, że elementy łączone (wałek i tulejka) są ciałami doskonale sztywnymi ($G_w = G_t = \infty$).



Rys. 4. Wpływ stosunku współczynników sprężystości poprzecznej kleju i elementów łączonych na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju

Z przebiegu krzywych przedstawionych na rys. 4 wynika, że wpływ współczynników sprężystości kleju i łączonych materiałów na rozkład naprężeń stycznych jest istotny. Odnosi się to w szczególności do szczytowych wartości naprężeń w kleju, mających istotny wpływ na wytrzymałość złącza i przebieg jego niszczenia.

Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjnych połączenia stożkowego na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju obrazują rys. 5, 6 i 7.

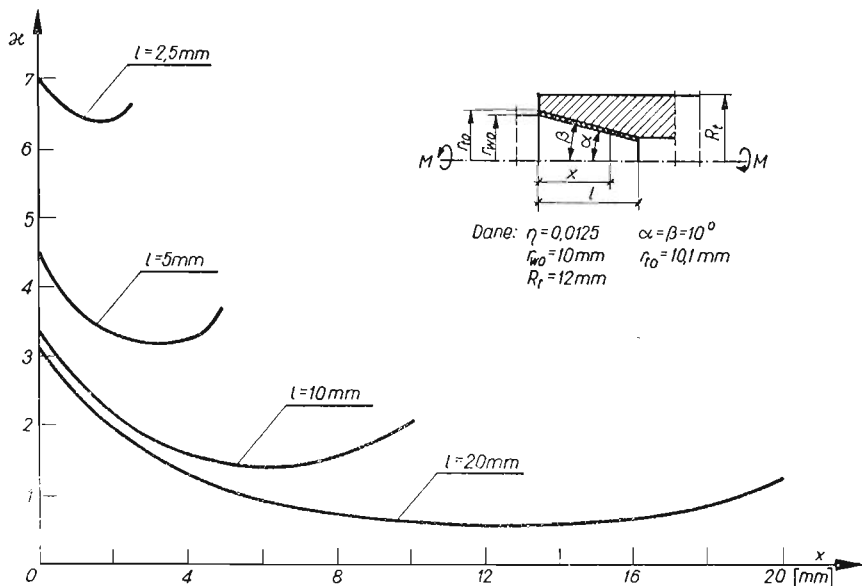


Rys. 5. Wpływ kąta pochylenia tworzącej stożka na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju

Z przebiegu krzywych na rys. 5 widać, że ze wzrostem kąta α rosną naprężenia w przekroju $x = 0$, a jednocześnie maleją naprężenia w przekroju $x = l$. Ze względów konstrukcyjnych, kąt pochylenia tworzącej stożka (rys. 3) musi spełniać warunek:

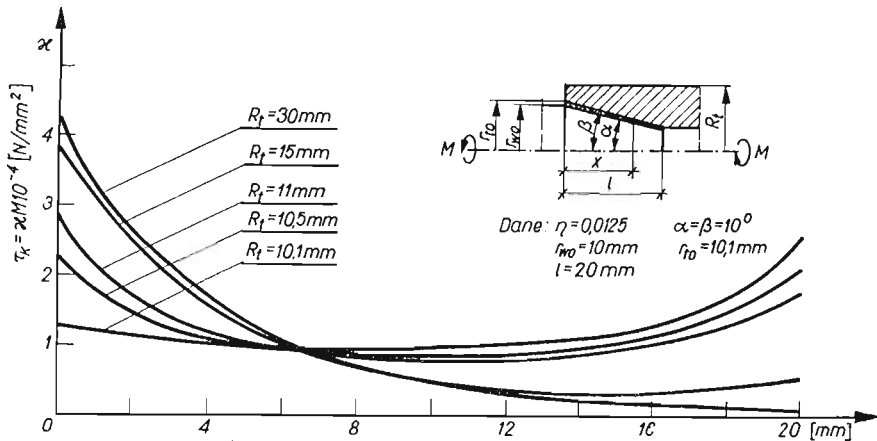
$$(41) \quad \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{r_{w0}}{l}.$$

Dla przyjętych do obliczeń wartości $r_{w0} = 10 \text{ mm}$, $l = 20 \text{ mm}$, kąt ten nie może być większy niż 25° . Należy również zaznaczyć, że przedstawiona powyżej teoria odnosi się tylko do małych wartości kątów α i β , z uwagi na przyjęte na początku założenia.



Rys. 6. Wpływ długości połączenia stożkowego na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju

Wpływ długości l połączenia przy stałym kącie α pochylenia stożka przedstawia rys. 6. Z przebiegu krzywych widać, że ze wzrostem długości połączenia naprężenia w warstwie kleju maleją, wzrasta jednak nierównomierność ich rozkładu i stosunek maksymalnej wartości naprężenia do jego wartości minimalnej i średniej.



Rys. 7. Wpływ promienia zewnętrznego tulejki połączenia stożkowego na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju

Na rys. 7 przedstawiono wpływ promienia zewnętrznego R tulejki na rozkład naprężeń stycznych w kleju. Krzywa $R_t = 10,1$ przedstawia rozkład naprężeń dla przypadku gdy praktycznie promień zewnętrzny wałka i tulejki są jednakowe. Ze wzrostem promienia zewnętrznego tulejki wzrastają naprężenia w przekroju $x = 0$, a maleją w przekroju $x = l$.

5. Uwagi i wnioski końcowe

Przedstawione w niniejszej pracy rozważanie i wyniki dotyczą modelu, w którym przyjęto szereg założeń upraszczających, przyjmowanych zwykle w teorii wytrzymałości materiałów. Pomimo tego wyprowadzone dla osiowo symetrycznego połączenia klejonego ogólne równanie różniczkowe (18), jak również wynikające z niego równanie (30) dla połączeń stożkowych, mają skomplikowaną postać i nie można ich rozwiązać znanymi sposobami analitycznymi. Dla uzyskania konkretnych wyników zachodzi konieczność rozwiązania odpowiedniego równania sposobem numerycznym, co jednakże przy wykorzystaniu ETO nie przedstawia większych trudności.

Opracowany na maszynie cyfrową ODRA 1204 program obliczeń dla połączeń stożkowych umożliwia szybkie wyznaczenie rozkładu i wartości naprężeń stycznych w warstwie kleju dla dowolnych zadanych wartości parametrów konstrukcyjnych i stałych materiałowych. Może on być z pożytkiem wykorzystany przy projektowaniu jak również przy programowaniu i interpretacji wyników badań doświadczalnych tego typu połączeń.

Z otrzymanych wyników obliczeń numerycznych (rys. 4 - 7) widać, że rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju na długości połączenia jest nieliniowy. W skrajnych przekrojach połączenia występują duże spiętrzenia naprężeń, znacznie przewyższające wartości średnie.

Są one spowodowane odkształceniami sprężystymi łączonych elementów. Analiza wyników obliczeń wykazuje, że zarówno parametry konstrukcyjne jak i współczynniki sprężystości materiałów łączonych i kleju mają istotny wpływ na rozkład naprężeń stycznych. Wynika z tego ważny praktyczny wniosek, że traktowanie w osiowo symetrycznym połączeniu klejonym elementów metalowych, pomimo znacznej (sięgającej dwóch rzędów) różnicy wartości współczynników sprężystości metalu i kleju, stanowi zbyt duże uproszczenie i prowadzi do poważnych błędów.

Przyjęty w pracy model osiowo symetrycznego połączenia klejonego pozwala wyjaśnić wpływ szeregu istotnych czynników na rozkład naprężeń stycznych w warstwie kleju oraz elementach łączonych i stanowi podstawę do poszukiwania rozwiązań optymalnych pod względem wytrzymałościowym. Zagadnienie to zostanie szczegółowo omówione w oddzielnej pracy.

Literatura cytowana w tekście

1. M. DEINHARDT, F. BLUME, H. KLEINERT, *Einsatzbedingungen der Klebtechnik zur Herstellung von Maschinenelementverbindungen*, Schweiss-Technik, 8, 22 (1972).
2. K. GRUDZIŃSKI, J. LORKIEWICZ, *Wytrzymałość na skręcanie klejonych połączeń walcowych*, Przegląd Mechaniczny, 8, 29 (1970).
3. K. GRUDZIŃSKI, J. LORKIEWICZ, *Analiza naprężeń w walcowej spoinie klejowej*, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. «Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych», Zbiór referatów, Szczecin 1972.
4. K. GRUDZIŃSKI, *Optymalizacja walcowego połączenia klejonego obciążonego momentem skręcającym*, Zbiór referatów konferencji, jak wyżej.
5. K. GRUDZIŃSKI, J. LORKIEWICZ, *Doświadczenia własne w stosowaniu klejenia metali*, Zbiór referatów konferencji, jak wyżej.
6. W. KOREWA, *Klejenie połączenia czopowego*, Przegląd Mechaniczny, 18, 31 (1972).
7. H. LEYH, *Drehmomentübertragung in geklebten Wellen — Nabenverbindungen*, Praca doktorska, Stuttgart 1963.
8. J. LORKIEWICZ, *Klejenie przedłużaczy wiertel i rozwiertaków*, Mechanik, 2, 40 (1967).
9. Я. М. КЕРШЕНБАУМ, В. Н. ПРОТАСОВ, В. И. АГАНЧЕВ, *Соединение стыков высоконапорных трубопроводов склеиванием*, Строительство трубопроводов, 5 (1971).
10. T. SIEGMÜLLER, *Zastosowanie klejenia metali do łączenia rur stalowych kolumn wiertniczych*, Przegląd Spawalnictwa, 3, 23 (1971).
11. R. SIKORA, *Klejenie rur*, Mechanik, 2, 45 (1972).
12. K. SCHMIDT, *Metalkleben in Schienen-Fahrzeugbahn*, Eisenbahningenieur, 9, 19 (1968).
13. H. SCHLEGEL, *Ausnutzung physikalische Effekte beim Kleben von Rundverbindungen*, ZIS Mitteilungen, 7 (1971).
14. А. П. ВЛАДИЗЬВСКИЙ, Э. А. АННЕНБЕРГ, Э. А. МАЙОРОВА, И. В. ТАРАСЕВИЧ, *Сборные цилиндрические зубчатые колеса*, Машиностроение, 8 (1970).
15. M. WARSZYŃSKI, B. ONYSZKO, M. ZYCH-PORĘBSKA, *Optymalne konstrukcje połączeń klejonych*, Przegląd Mechaniczny 17, 29 (1970).
16. A. A. BARTEL, *Passungsrost bzw. Reiboxydation-besondere Verschleissprobleme*, Der Maschinenschaden 7/8, 11/12, 36 (1963), 3/4, 37 (1964).
17. S. TIMOSHENKO, I. N. GOODIER, *Teoria sprężystości*, Arkady, Warszawa 1962.
18. G. N. POŁOŻY, N. A. PACHARIEWA, J. Z. STIEPANIENKO, P. S. BONDARENKO, I. M. WIELIKOIWANIENKO, *Metody przybliżonych obliczeń*, WNT, Warszawa 1966.
19. T. BURDA, *Analiza naprężeń i odkształceń w połączeniu klejonym stożkowym obciążonym momentem skręcającym*, Praca dyplomowa, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1973.

20. K. GRUDZIŃSKI, *Badania własności mechanicznych klejów i połączeń klejonych przy czystym ścinaniu*, Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. «Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych», Zbiór referatów, Szczecin 1972.

Р е з ю м е

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ
КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЖЕННОМ КРУТЯЩИМ МОМЕНТОМ

В работе дан аналитический метод расчета напряженного состояния в осесимметричном клеевом соединении, нагруженном крутящим моментом. Соединяемые элементы и слой клея считаются упругими. Выведены уравнения, описывающие распределение крутящих моментов в соединяемых элементах и распределение касательных напряжений в слое клея по длине соединения. Детально рассмотрены конические соединения. Оговорено влияние физических констант материала и конструктивных параметров на распределение касательных напряжений в слое клея.

S u m m a r y

DETERMINATION OF STRESS IN AXIALLY-SYMMETRIC GLUED JOINT
LOADED BY TORQUE

The paper presents an analytical method of determining the state of stress in an axially-symmetric glued joint loaded by a torque. In the model proposed the elements of the joint and the glue layer are treated as elastic deformable bodies. The equations are derived which yield the formulae describing the distribution of twisting moments in the elements of the joint, and the shearing stress in the glue layer.

A conical joints is discussed in more detail. The influence of material constants and structural parameters on the shearing stress distribution is outlined.

INSTYTUT BUDOWY MASZYN
POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ

Praca została złożona w Redakcji dnia 2 maja 1977 r.
