

ANALIZA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ W SPOINIE KLEJOWEJ POŁĄCZENIA ZAKŁADKOWEGO W ZAKRESIE ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH

JAN GODZIMIRSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

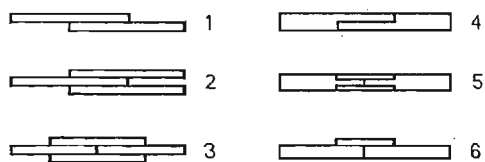
Zaproponowano metodą określania naprężeń stycznych w spoinach klejowych połączeń zakładkowych pracujących na ścinanie w zakresie plastycznych odkształceń klejonych elementów oraz przy uwzględnieniu nieliniowości charakterystyk klejów. Przyjęto dla kleju i klejonych elementów model ciała sprężysto-plastycznego z umocnieniem.

Wykaz oznaczeń

G (G_k , G_u)	— moduł sprężystości postaciowej kleju
E	— moduł sprężystości podłużnej klejonych elementów
δ_k	— grubość spoiny klejowej
δ	— grubość klejonego elementu
γ	— kąt odkształcenia postaciowego
ε	— wydłużenie względne
τ	— naprężenia styczne
σ	— naprężenia normalne
σ_0	— naprężenia normalne w klejonym elemencie występujące poza spoiną
D	— moduł umocnienia klejonego elementu
$R_{0,2}$	— granica plastyczności materiału klejonego elementu
l	— długość spoiny klejowej
z	— położenie przekroju w którym w klejonym elemencie lub spoinie występuje — zmiana modułu sprężystości.
τ_z	— wartość naprężeń stycznych przy których następuje zmiana modułu sprężystości kleju.

1. Wstęp

Połączenia zakładkowe (rys. 1) są najczęściej stosowanymi w technice połączeniami klejonymi. Analiza rozkładu naprężeń w spoinach takich połączeń była tematem wielu



Rys. 1. Przykłady kolejnych połączeń zakładkowych

rozważań teoretycznych [1] [2] [3]. W rozważaniach tych przyjmowano następujące założenia upraszczające:

- pracę klejonych elementów w zakresie odkształceń sprężystych,
- liniowo-sprężystą charakterystykę kleju,
- stałość naprężeń wzdłuż grubości spoiny klejowej.

W najbardziej popularnej teorii Volkersena dodatkowo założono, że w spoinach takich połączeń występują jedynie naprężenia styczne.

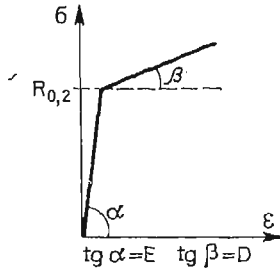
Analiza naprężeń w spoinach połączeń zakładkowych metodą elementów skończonych z wykorzystaniem maszyn cyfrowych [4] wykazuje, że w połączeniach, w których klejone elementy nie są obciążone zewnętrznymi momentami gnącymi oraz siłami poprzecznymi, teoria Volkersena dosyć dokładnie odwzorowuje rozkład naprężeń stycznych. Naprężenia te nie są naprężeniami jedynymi, ale one głównie wpływają na stopień wyężenia materiału spoiny.

Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie, jaki wpływ na rozkład naprężeń stycznych w spoinach połączeń zakładkowych ma przekroczenie granicy plastyczności w klejonych elementach oraz jak wpływa nieliniowość charakterystyk klejów na wytrzymałość takich połączeń.

2. Założenia

W rozważaniach pominięto naprężenia normalne występujące w spoinach połączeń zakładkowych i założono, że rozkład naprężeń stycznych z dostateczną dokładnością odwzorowuje zależność Volkersena [2]. Zaniedbanie niewspółosiowości sił zewnętrznych wydaje się dopuszczalne w wypadku niektórych typów połączeń, np. przykłady 2, 3, 4, 5 na rys. 1 zwłaszcza, gdy klejone elementy są cienkie. Oceniając wpływ pracy klejonych elementów w zakresie odkształceń plastycznych na rozkład naprężeń, założono liniowo-sprężystą charakterystykę kleju, a oceniając wpływ nieliniowości charakterystyki kleju na wytrzymałość połączenia, założono pracę klejonych elementów w zakresie odkształceń sprężystych. Przyjęto, że zależność między naprężeniami i odkształceniami kleju i klejonych elementów można zastąpić modelem ciała sprężysto-plastycznego z umocnieniem (rys. 2). W wypadku klejonych elementów metalowych założenie takie nie budzi zastrzeżeń. Taki właśnie model metali przyjmuje się z powodzeniem w obliczeniach parametrów przeróbki plastycznej metali [5]. W wypadku klejów założenie takie jest większym uproszczeniem, ponieważ kleje są ciałami lepkosprężystymi. Założenie to można uznać za dopuszczalne, gdy przyjmiemy, że rozpatrujemy wytrzymałość spoiny przy określonej prędkości jej odkształcenia. W rzeczywistości prędkość odkształcenia spoiny w jej róż-

nych przekrojach nie jest stała. Jednak badania wykazują [6], że np. wytrzymałość spoin epoksydowych nie jest zależna od prędkości odkształcania w stosunkowo dużych ich przedziałach (zmienianie prędkości od 5 mm/min do 90 mm/min praktycznie nie powoduje zmiany wytrzymałości połączeń).

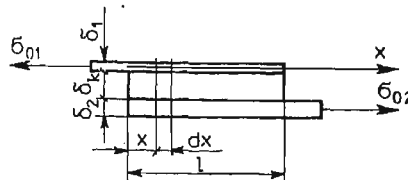


Rys. 2. Wykres rozciągania materiałów sprężysto-plastycznych z umocnieniem: E — moduł sprężystości podłużnej, D — moduł umocnienia

Biorąc pod uwagę przyjęte założenia upraszczające, a zwłaszcza pominięcie naprężeń normalnych w spoinach i założenie stałości naprężeń na grubości spoiny można stwierdzić, że uzyskane zależności analityczne mogą mieć tylko charakter poglądowy i służyć do jakościowej oceny wpływu nieliniowości charakterystyk materiałów zakładkowych połączeń klejonych na ich wytrzymałość.

3. Rozkład naprężeń w spoinie połączenia zakładkowego w zakresie plastycznych odkształceń klejonych elementów

Model rozpatrywanego połączenia przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Model obciążenia połączenia zakładkowego pracującego na ścinania

Naprężenia styczne w spoinie są funkcją kąta odkształcenia kleju (γ) i jego modułu sprężystości postaciowej G_k :

$$\tau = \gamma \cdot G_k \tag{1}$$

Uwzględniając przyjęte założenia:

$$d\tau = d\gamma \cdot G_k \tag{2}$$

Zmianę kąta odkształcenia spoiny na jej elementarnym odcinku dx można opisać zależnością:

$$d\gamma = \frac{\epsilon dx_1}{\delta_k} - \frac{\epsilon dx_2}{\delta_k} \tag{3}$$

w której:

δ_k — grubość spoiny,
 $\varepsilon dx_1, \varepsilon dx_2$ — odkształcenia elementarnych odcinków klejonych elementów spowodowane występującymi w nich naprężeniami normalnymi ($\sigma_1(x), \sigma_2(x)$).

W wypadku sprężystego odkształcenia klejonych elementów:

$$\varepsilon = \frac{\sigma(x)}{E}, \quad (4a)$$

a w wypadku odkształcenia plastycznego:

$$\varepsilon = \frac{R_{0,2}}{E} + \frac{\sigma(x) - R_{0,2}}{D} \quad (4b)$$

Podstawiając (3) i (4a) lub (4b) do (2) otrzymujemy:

$$d\tau = \frac{\sigma_1(x)}{E_1} \cdot \frac{dx G_k}{\delta_k} - \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \cdot \frac{dx G_k}{\delta_k}, \quad (5a)$$

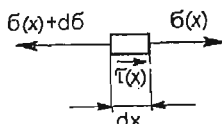
$$d\tau = \frac{G_k}{\delta_k} dx \left(\frac{R_{0,2}}{E_1} + \frac{\sigma_1(x)}{D_1} - \frac{R_{0,2}}{D_1} - \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \right). \quad (5b)$$

Z warunku równowagi sił działających na elementarny odcinek klejonego elementu (rys. 4):

$$d\sigma_1(x) \delta_1 = \tau(x) dx \quad (6)$$

można obliczyć:

$$d\tau(x) = \frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} dx \delta_1. \quad (7)$$



Rys. 4. Obciążenie elementarnego odcinka klejonego elementu połączenia zakładkowego

Podstawienie zależności (7) do równania (5a) umożliwia uzyskanie równania różniczkowego opisującego rozkład naprężeń normalnych w elemencie „1” na odcinku spoiny przy założeniu sprężystych odkształceń obu elementów:

$$\frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} = \frac{G_k}{\delta_k \delta_1} \left(\frac{\sigma_1(x)}{E_1} - \frac{\sigma_2(x)}{E_2} \right). \quad (8)$$

Z warunku równowagi sił działających na odcinek połączenia klejonego (rys. 5) otrzymujemy:

$$\sigma_{01} \delta_1 = \sigma_1(x) \delta_1 + \sigma_2(x) \delta_2. \quad (9)$$

Uwzględnienie zależności (9) umożliwia przedstawienie równania (8) w postaci:

$$\frac{d^2\sigma_1(x)}{dx^2} = \frac{G_k \sigma_1(x)}{\delta_k} \cdot \frac{E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2}{E_1 \delta_1 E_2 \delta_2} - \frac{G_k}{\delta_k} \cdot \frac{\sigma_{01}}{E_2 \delta_2}. \quad (10)$$



Rys. 5. Obciążenie odcinka połączenia zakładkowego

Jeżeli w elemencie oznaczonym „1” na pewnym odcinku zostanie przekroczona granica plastyczności materiału to równanie opisujące rozkład naprężeń normalnych w elemencie na tym odcinku przybiera postać:

$$\frac{d^2 \sigma_1(x)}{dx^2} = \frac{G_k}{\delta_k \delta_1} \left(\frac{R_{0,2}}{E_1} - \frac{R_{0,2}}{D_1} - \frac{\sigma_{01} \delta_1}{E_2 \delta_2} + \sigma_1(x) \frac{\delta_2 E_2 + \delta_1 D_1}{E_2 D_1 \delta_2} \right). \quad (11)$$

Założmy, że na odcinku spoiny $0 \leq x \leq z$ została przekroczona granica plastyczności w elemencie „1” i dla tego odcinka obowiązuje zależność (11), zaś dla odcinka spoiny $z < x \leq l$ obciążonego w zakresie odkształceń sprężystych klejonych elementów obowiązuje zależność (10).

Zastosowanie podstawień:

$$T = \frac{D_1 \delta_1}{E_2 \delta_2} \quad \text{i} \quad n = \sqrt{\frac{G_k(1+T)}{\delta_k D_1 \delta_1}},$$

oraz przyjęcie warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} \text{dla } x = 0 \quad \sigma_1(x) &= \sigma_{01}, \\ \text{dla } x = z \quad \sigma_1(x) &= R_{0,2}, \end{aligned}$$

pozwała uzyskać rozwiązanie równania (11) w postaci:

$$\begin{aligned} \sigma_1(x) = & \\ = & \frac{\operatorname{sh} n x \left\{ R_{0,2} \left[1 - \frac{1}{1+T} \left(1 - \frac{D_1}{E_1} \right) \right] - \sigma_{01} \frac{T}{1+T} \right\} - \operatorname{sh} n(z-x) \left\{ \frac{\sigma_{01}}{1+T} - \frac{R_{0,2}}{1+T} \left(1 - \frac{D_1}{E_1} \right) \right\}}{\operatorname{sh} n z} + \\ & + \sigma_{01} \frac{T}{1+T} + \frac{R_{0,2}}{1+T} \left(1 - \frac{D_1}{E_1} \right). \quad (12) \end{aligned}$$

Zastosowanie podstawień:

$$S = \frac{E_1 \delta_1}{E_2 \delta_2} \quad \text{i} \quad m = \sqrt{\frac{G_k(1+S)}{\delta_k E_1 \delta_1}},$$

oraz przyjęcie warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} \text{dla } x = z \quad \sigma_1(x) &= R_{0,2}, \\ \text{dla } x = l \quad \sigma_1(x) &= 0, \end{aligned}$$

umożliwia rozwiązanie równania (10):

$$\sigma_1(x) = \sigma_{01} \frac{S}{S+1} + \frac{R_{0,2} \operatorname{sh} m(l-x) - \frac{S}{S+1} \sigma_{01} (\operatorname{sh} m(l-x) + \operatorname{sh} m(x-z))}{\operatorname{sh} m(l-z)}. \quad (13)$$

Wykorzystując równanie (6) można określić rozkład naprężeń stycznych w spoinie na odcinku plastycznych odkształceń elementu „1”

$$\tau_x = \sqrt{\frac{G_k(1+T)}{\delta_k D_1}} \delta_1 \cdot \frac{\operatorname{ch} nx \left(R_{0,2} \frac{2T}{1+T} - \sigma_{01} \frac{T}{1+T} \right) - \operatorname{ch} n(z-x) \left(\frac{\sigma_{01}}{1+T} - R_{0,2} \frac{1-T}{1+T} \right)}{\operatorname{sh} nz} \quad (14)$$

i na odcinku odkształceń sprężystych:

$$\tau_x = \sqrt{\frac{G_k(1+S)\delta_1}{\delta_k E_1}} \cdot \frac{\frac{S}{S+1} \sigma_{01} (\operatorname{ch} m(l-x) - \operatorname{ch} m(x-z)) - R_{0,2} \operatorname{ch} m(l-x)}{\operatorname{sh} m(l-z)}} \quad (15)$$

W równaniach (12) (13) (14) i (15) występuje niewiadoma z określającą położenie punktu, w którym poziom naprężeń w mniej sztywnym elemencie „1” jest równy granicy plastyczności materiału — $R_{0,2}$. Zależność między wartością naprężeń w nie objętej spoiną części elementu „1” (σ_{01}), a wartością z można wyznaczyć z warunku, że naprężenia styczne w punkcie $x = z$ obliczone z zależności (14) i (15) są sobie równe:

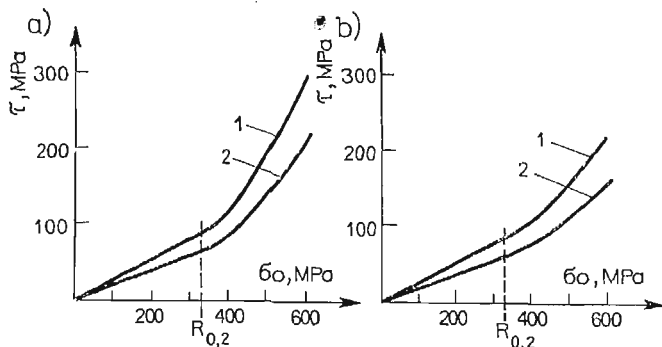
$$\sigma_{01} = R_{0,2} \frac{\frac{T(S+1)}{S(T+1)} \operatorname{ch} nz + \frac{S-T}{S(T+1)} + \sqrt{\frac{(S+1)T}{(T+1)S}} \frac{\operatorname{ch} m(l-z)}{\operatorname{sh} m(l-z)} \operatorname{sh} nz}{\frac{T \operatorname{ch} nz + 1}{T+1} + \sqrt{\frac{(S+1)T}{(T+1)S}} \frac{S}{S+1} \frac{\operatorname{ch} m(l-z) - 1}{\operatorname{sh} m(l-z)} \operatorname{sh} nz} \quad (16)$$

Uwzględniając, że dla określonych wymiarów połączeń klejonych:

$$\operatorname{ch} m(l-z) \simeq \operatorname{sh} m(l-z) \gg 1$$

zależność (16) można uprościć do postaci:

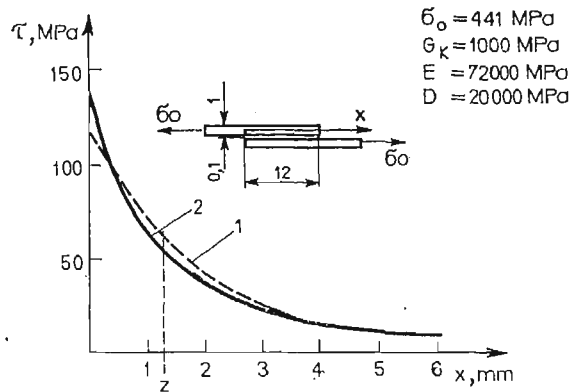
$$\sigma_{01} = R_{0,2} \frac{\frac{T(S+1)}{S(T+1)} \operatorname{ch} nz + \frac{S-T}{S(T+1)} + \sqrt{\frac{T(S+1)}{S(T+1)}} \operatorname{sh} nz}{\frac{T \operatorname{ch} nz + 1}{T+1} + \sqrt{\frac{(1+S)T}{(1+T)S}} \frac{S}{S+1} \operatorname{sh} nz} \quad (17)$$



Rys. 6. Zależność maksymalnych naprężeń stycznych w spoinie połączenia zakładkowego w funkcji naprężeń normalnych występujących w klejonych elementach: a) $D = 10000$ MPa, b) $D = 20000$ MPa, 1 — $\delta = 1$ mm, 2 — $\delta = 0,5$ mm

Wartość maksymalnych naprężeń stycznych występujących w spoinach połączeń zakładkowych pracujących na ścinanie w zakresie plastycznych odkształceń klejonych elementów można wyznaczyć z zależności (14) podstawiając za x wartość 0. W równaniu (14) występują dwie zależne od siebie wielkości z i σ_{01} . W związku z tym, że równanie (17) trudno jest tak przekształcić, aby uzyskać zależność $z = f(\sigma_{01})$ dla określonego złącza można sporządzić wykres $\sigma_{01} = f(z)$ i z tego wykresu wyznaczać wartość z dla określonego poziomu naprężeń σ_{01} .

Na podstawie zależności (14) i (17) wykonano wykresy $\tau_{max} = f(\sigma_{01})$ dla połączeń zakładkowych identycznych elementów $E_1 = E_2$ i $\delta_1 = \delta_2$ (rys. 6). W obliczeniach założono: $E = 72000$ MPa, $R_{0,2} = 330$ MPa, $G_k = 1000$ MPa, $\delta_k = 0,1$ mm, $l = 25$ mm. Obliczenia i wykresy wykonano dla dwóch wartości modułu umocnienia klejonych materiałów: $D = 10000$ MPa i $D = 20000$ MPa oraz dwóch grubości klejonych elementów $\delta = 0,5$ mm i $\delta = 1$ mm. Stwierdzono, że wzrost naprężeń stycznych towarzyszący przekroczeniu granicy plastyczności w klejonych elementach jest mniejszy w wypadku elementów cienkich, charakteryzujących się większą wartością modułu umocnienia.



Rys. 7. Rozkład naprężeń stycznych w spoinie połączeń zakładkowych jednakowo obciążonych przy: 1 — sprężystych odkształceniach obu klejonych elementów $R_{0,2} > \sigma_{01}$; 2 — przekroczeniu granicy plastyczności w klejonych elementach $R_{0,2} = 330$ MPa

Na rys. 7 przedstawiono rozkład naprężeń stycznych w spoinie połączenia, w którego elementach została przekroczona granica plastyczności materiału. Na rysunku tym linią przerywaną zaznaczono rozkład naprężeń stycznych, jaki wystąpiłby w tej spoinie przy identycznej wartości sił obciążających połączenie, jeżeli klejone materiały charakteryzowałyby większą wartością granicy plastyczności i obciążone byłyby w zakresie odkształceń sprężystych (rozkład wyznaczony z zależności Volkersena).

Pomimo założenia stosunkowo korzystnych warunków pracy połączenia (cienkie elementy i wysoka wartość modułu umocnienia), wzrost wartości maksymalnych naprężeń stycznych w spoinie spowodowany przekroczeniem granicy plastyczności klejonych materiałów powinien wynosić około 17%.

4. Wytrzymałość połączenia zakładkowego przy uwzględnieniu nieliniowości charakterystyki kleju

Rozpatrzono zakładkowe połączenie klejowe składające się z dwóch jednakowych elementów pod wpływem obciążenia σ_{01} . Zmianę naprężeń normalnych w klejonym elemencie tego połączenia na odcinku spoiny opisuje zależność:

$$\frac{d^2 \sigma(x)}{dx^2} - \frac{2G}{\delta_k E \delta} \sigma(x) = -\sigma_{01} \frac{G}{\delta_k E \delta}. \quad (18)$$

Przyjęto, że w pewnej odległości od krawędzi spoiny klejowej $x = z$ występują takie naprężenia w spoinie, którym towarzyszy zmiana modułu sprężystości kleju. Wprowadzono oznaczenia:

$$\begin{aligned} \text{dla } x \leq z \quad G = G_u \quad \text{i} \quad \sqrt{\frac{2G_u}{\delta \delta_k E}} = n, \\ \text{dla } x > z \quad G = G_k \quad \text{i} \quad \sqrt{\frac{2G_k}{\delta \delta_k E}} = m, \end{aligned}$$

przy których rozwiązanie równania (18) ma postać:

$$\begin{aligned} \sigma_1(x) &= C_1 e^{nx} + C_2 e^{-nx} + \frac{\sigma_{01}}{2} \quad \text{dla } x \leq z, \\ \sigma_2(x) &= C_3 e^{mx} + C_4 e^{-mx} + \frac{\sigma_{01}}{2} \quad \text{dla } x > z. \end{aligned} \quad (19)$$

Wartości stałych całkowania C występujących w zależnościach (19) można wyznaczyć uwzględniając następujące warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} \text{dla} \quad x = 0 \quad \sigma_1 &= \sigma_{01}, \\ x = z \quad \sigma_1 &= \sigma_2, \\ x = z \quad \tau_1 &= \tau_2, \\ x = \frac{l}{2} \quad \tau' &= 0. \end{aligned}$$

Wyznaczenie stałych całkowania i podstawienie ich do zależności (19) pozwala przedstawić je w postaci:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_{01} e^{-nz} \cdot e^{nx} \frac{n \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) - m \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right)}{4n \operatorname{ch} n z \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + 4m \operatorname{sh} n z \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right)} + \\ + \frac{\sigma_{01}}{2} + \sigma_{01} e^{nz} \cdot e^{-nx} \frac{m \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + n \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right)}{4n \operatorname{ch} n z \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + 4m \operatorname{sh} n z \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right)}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{01}}{2} + \frac{\sigma_{01} n \left(e^{\frac{ml}{2}} e^{-mx} - e^{-\frac{ml}{2}} e^{mx} \right)}{4n \operatorname{ch} nz \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + 4m \operatorname{sh} nz \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right)}$$

Uwzględniając zależność (6) można wyznaczyć rozkład naprężeń stycznych w spoinie rozpatrywanego połączenia. Dla $x < z$:

$$\tau(x) = \sigma_{01} \sqrt{\frac{2G_u \delta}{E\delta_k}} \times \frac{e^{-n(z-x)} \left\{ n \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) - m \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right) \right\} - e^{n(z-x)} \left\{ m \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + n \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) \right\}}{4n \operatorname{ch} nz \cdot \operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) + 4m \operatorname{sh} nz \cdot \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right)}$$

(21)

Ponieważ dla większości połączeń klejowych można przyjąć, że:

$$\operatorname{sh} m \left(\frac{l}{2} - z \right) \simeq \operatorname{ch} m \left(\frac{l}{2} - z \right),$$

zależność (21) można uprościć do postaci:

$$\tau_x = \sigma_{01} \sqrt{\frac{G_u \delta}{2E\delta_k}} \frac{(n-m)e^{-n(z-x)} - (n+m)e^{n(z-x)}}{2(n \operatorname{ch} nz + m \operatorname{sh} nz)}$$

(22)

Dla $x = 0$ naprężenia styczne osiągają wartość maksymalną:

$$\tau_0 = \tau_{max} = -\sigma_{01} \sqrt{\frac{G_u \delta}{2E\delta_k}} \frac{m \operatorname{ch} nz + n \operatorname{sh} nz}{n \operatorname{ch} nz + m \operatorname{sh} nz}$$

(23)

Dla $x = z$ zależność (22) przybiera postać:

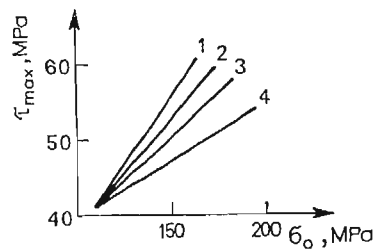
$$\tau_z = -\sigma_{01} \sqrt{\frac{G_u \delta}{2E\delta_k}} \frac{m}{n \operatorname{ch} nz + m \operatorname{sh} nz}$$

(24)

Naprężenia $\tau(z)$ są naprężeniami, przy których następuje zmiana modułu sprężystości kleju. Dla określonego kleju mają one wartość stałą i można je wyznaczyć z krzywej rozciągania kleju.

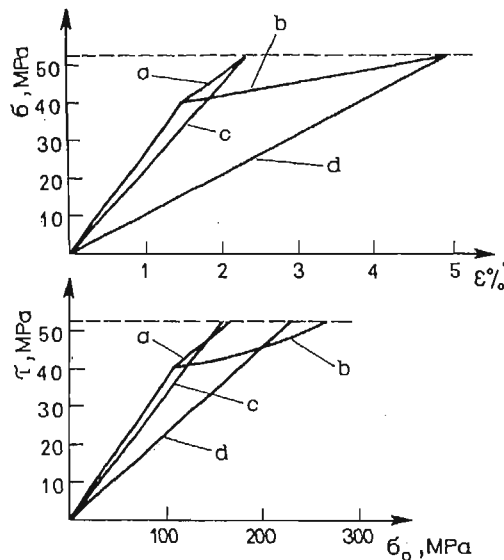
W związku z tym, że z zależności (24) trudno jest wyznaczyć $z = f(\sigma_{01}, \tau(z))$ w praktyce korzystnie jest założyć kilka wartości „ z ” i obliczyć $\sigma_{01} = f(z, \tau(z))$, a następnie założone wartości „ z ” i obliczone σ_{01} podstawić do zależności (23) w celu obliczenia wartości maksymalnych naprężeń stycznych τ_{max} .

Stosując taki tok postępowania obliczono zależność $\tau_{max} = f(\sigma_{01})$ dla zakładkowego połączenia pracującego na ścinanie. W obliczeniach przyjęto następujące parametry połączenia: $E = 72000$ MPa, $\delta = 2$ mm, $\delta_k = 0,1$ mm, $G_k = 1000$ MPa, $\tau(z) = 40$ MPa oraz różne wartości modułu umocnienia kleju $G_u = 800, 600$ i 400 MPa. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 8. W porównaniu z klejem o charakterystyce liniowo-sprężystej stwierdzono wzrost wytrzymałości połączeń — większy w wypadku kleju o mniejszej wartości modułu umocnienia.



Rys. 8. Zależność maksymalnych naprężeń stycznych w spoinach połączeń zakładkowych w funkcji obciążenia: 1 — $G_k = 1000$ MPa (charakterystyka liniowa), 2 — $G_u = 800$, 3 — $G_u = 600$, 4 — $G_u = 400$ MPa (charakterystyki nieliniowe)

Obliczanie maksymalnych naprężeń stycznych w spoinach klejowych pracujących na ścinanie, przy założeniu nieliniowości charakterystyk klejów jest kłopotliwe i bardziej pracochłonne w porównaniu z obliczeniami prowadzonymi przy założeniu liniowej charakterystyki kleju. W pracy [7] sugerowano możliwość uwzględniania nieliniowości charakterystyk klejów poprzez wprowadzanie tak zwanego siecznego modułu sprężystości (tangens kąta prostej łączącej początek i koniec krzywej rozciągania) i traktowania kleju jako ciała liniowo-sprężystego o takiej właśnie wartości modułu sprężystości. W celu stwierdzenia, czy uproszczenia takie jest dopuszczalne obliczono zależności $\tau_{max} = f(\sigma_{01})$ dla dwóch klejów o nieliniowych charakterystykach i porównano je z zależnościami obliczonymi z zastosowaniem siecznego modułu sprężystości (rys. 9). Stwierdzono dopuszczalność stosowania w obliczeniach siecznego modułu sprężystości w wypadku małego zakresu odkształceń plastycznych kleju.



Rys. 9. Krzywe rozciągania czterech klejów (a, b, c i d) oraz zależności maksymalnych naprężeń stycznych w spoinach połączeń zakładkowych w funkcji obciążenia obliczone dla tych klejów

5. Wnioski

1. W wypadku przekroczenia granicy plastyczności w klejonych elementach połączenia zakładkowego pracującego na ścinanie następuje dodatkowe spiętrzenie naprężeń w spoinie, a więc spadek jej wytrzymałości. Wartość przyrostu naprężeń jest zależna głównie od wartości modułu umocnienia materiału klejonego elementu, w którym została przekroczona granica plastyczności — w wypadku mniejszych wartości modułu umocnienia przyrost naprężeń jest większy.

2. Nieliniowość charakterystyk klejów istotnie wpływa na wytrzymałość połączeń zakładkowych pracujących na ścinanie i należy ją uwzględnić w obliczeniach wytrzymałościowych. Spadek modułu sprężystości kleju wraz ze wzrostem jego odkształceń korzystnie wpływa na wytrzymałość połączeń zakładkowych. Jedynie w wypadku klejów, które charakteryzuje mały zakres odkształceń plastycznych można uwzględnić ich nieliniowość przyjmując do obliczeń zastępczą wartość modułu sprężystości kleju równą wartości modułu siecznego.

Literatura

1. *Адгезия. Клеи, цементы, припои*, Москва, Издательство Иностранной Литературы, 1954.
2. N. K. BENSON, *Influence of stress distribution on the strength of bonded joints, Adhesion. Fundamentals and practice*, Elsevier Publishing Co, 1970.
3. D. O. ELEY, *Adhesion*, Oxford University Press, 1961.
4. J. GODZIMIRSKI, *Określanie naprężeń w spoinach metodą elementów skończonych*, Biul. WAT Nr 11 1985.
5. В. ДАВЫДОВ, *Изделия из тонкостенных профилей*, Москва 1957.
6. S. DONMIRSKI, *Modyfikacja klejów epoksydowych i właściwości otrzymanych połączeń klejowych*, Rozprawa doktorska WAT, Warszawa 1965.
7. R. SICHOWICZ, *Przydatność metod określania nośności granicznej metalowych połączeń klejowych w świetle badań laboratoryjnych*, Biul. WAT nr 6 1968.

Резюме

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛЕЕВОМ СЛОЕ СОЕДИНЕНИЯ В НАХЛЕСТКУ В ОБЛАСТИ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИИ

Предложен метод определения напряжений сдвига в клеевом соединении, которое работает на сдвиг в области пластических деформации клееных элементов, а также при участии нелинейностей характеристик клеев. Для клея и клееных элементов принято модель тела упруго-пластического с упрочнением.

Summary

ANALYSIS OF STRESS DISTRIBUTION IN THE ADHESIVE OF LAP JOINTS WITHIN THE RANGE OF PLASTIC DEFORMATIONS

A method is proposed for defining the shearing stress in a glued joint that works in shearing within the range of plastic deformations of glued materials with nonlinear characteristic of adhesive taken into consideration. Models of elastic-plastic bodies with strain-hardening is assumed for the adhesive and glued materials.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 7 stycznia 1987 roku.