

Analiza stanów naprężeń w procesach ciągnięcia i hydrostatycznego wyciskania drutu

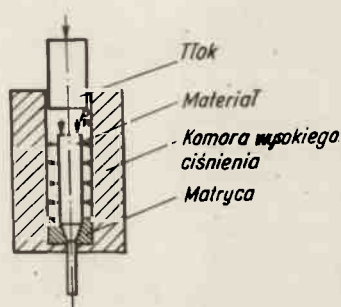
WPROWADZENIE

Rzeczony przemysłu elektronicznego w naszym kraju powoduje stały wzrost zapotrzebowania na bardzo cienkie druty o średnicach schodzących do $\phi = 20 \mu\text{m}$. Zapotrzebowanie to jest pokrywane głównie dostawami z importu. Wykorzystanie i opanowanie w skali przemysłowej procesu hydrostatycznego wyciskania tego rodzaju drutów ograniczyłoby, a nawet wyeliminowałoby potrzebę ich zakupu za granicą.

Wyrób bardzo cienkich drutów w sposób tradycyjny, za pomocą przeciągania przez ciągnadła o odpowiednio zmniejszających się średnicach, jest bardzo pracochłonny. Wymaga bardzo wielu operacji ciągnięcia oraz szeregu międzyoperacyjnych procesów wyżarzania rekrytalizującego. W miarę zmniejszającej się średnicy ciągniętego drutu coraz większe trudności występują przy ścienianiu końca drutu wprowadzanego do ciągnadła. Coraz częściej występuje też rwanie się ciągniętego drutu, co uniemożliwia prowadzenie procesu na wielociągach i ogromnie zwiększa pracochłonność procesu.

Rwanie się bardzo cienkich drutów w procesie ciągnięcia spowodowane jest wzrastającym udziałem sił tarcia wynikającym ze względnego wydłużenia części kalibrującej ciągnadła. Ta skłonność do rwania się drutów jest szczególnie wysoka przy materiałach słabo umacniających się.

Szeregu tych niedogodności i ujemnych stron ciągnięcia unika się przy zastosowaniu procesu wyciskania hydrostatycznego /rys. 1/.



Rys. 1. Schemat procesu wyciskania hydrostatycznego

Materiał umieszczony w komorze wysokiego ciśnienia, poddany hydrostatycznemu ciśnieniu p ciecży, wypływa przez otwór matrycy. W tym przypadku, w czasie wyciskania, drut znajduje się pod działaniem trójosiowego stanu naprężeń ściskających. Eliminuje to całkowicie rwanie się drutu. Ponadto można wielokrotnie zwiększyć stopień odkształcenia.

Warto również nadmienić, że wzrost ciśnienia hydrostatycznego opóźnia proces rozdzielenia materiału. Tak np. Bridgeman [1] rozciągając próbki ze stali węglowej poddane ciśnieniu 30 000 atm uzyskał niemal 100% przewężenia.

Możliwość stosowania w procesie wyciskania hydrostatycznego wielokrotnie większych odkształceń niż w procesie zwykłego ciągnięcia pozwala na znaczne zmniejszenie pracochłonności, ilości stosowanych urządzeń i narzędzi.

1. STANY ODKSZTAŁCENI I NAPRĘŻEN WYSTĘPUJĄCE W PROCESACH CIĄNIENIA I HYDROSTATYCZNEGO WYCISKANIA

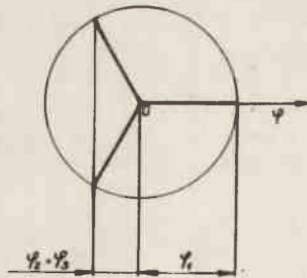
1.1. Stan odkształceń

Proces hydrostatycznego wyciskania jest realizowany najczęściej zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1. W niektórych przypadkach drut opuszczający matrycę jest dodatkowo obciążony siłą ciągnącą. Ma to na celu zmniejszenie ciśnienia wyciskania oraz zapewnienie statycznego przebiegu procesu.

W procesie ciągnięcia oraz hydrostatycznego wyciskania występuje ten sam schemat odkształceń plastycznych, odpowiadający wydłużaniu, dla którego składowe odkształcenia wynoszą:

$$\varphi_1 = \varphi \quad \varphi_2 = \varphi_3 = -\frac{\varphi}{2}$$

Dla takich składowych gwiazdę odkształceń plastycznych przedstawiono na rys. 2. Jak widać z rysunku kąt skręcenia gwiazdy $\omega = 0$.



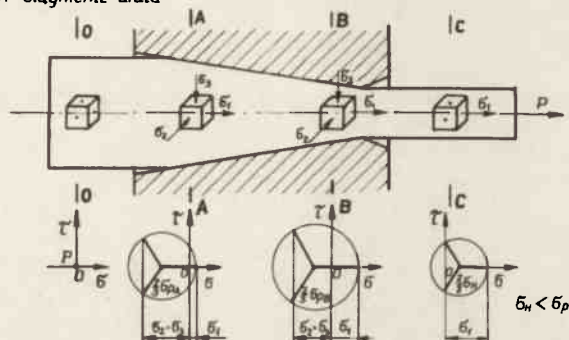
Rys. 2. Gwiazda odkształceń odpowiadająca wydłużeniu

1.2. Stan naprężeń

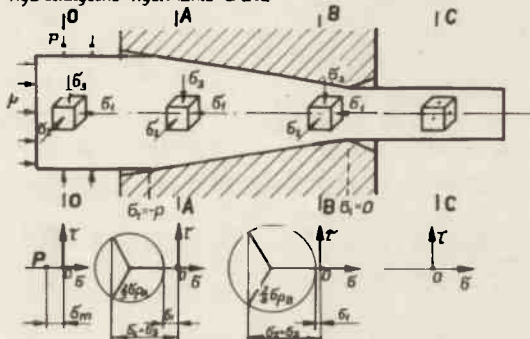
Zgodnie z prawem płynięcia Misesa schemat składowych stanu naprężenia jest taki sam, jak stanu odkształcenia, natomiast przesunięcie gwiazdy w stosunku do początku układu może być różne, zależnie od położenia rozpatrywanego przekroju w stożku kształtującym oraz sposobu realizacji procesu wydłużania.

Na rys. 3 przedstawiono schematycznie stany naprężenia występujące w wybranych przekrojach drutu ciągniętego oraz wyciskanego hydrostatycznie. •

A Ciągnienie drutu



B Hydrostatyczne wyciskanie drutu



Rys. 3. Schemat naprężeń występujący przy: A - ciągnięciu drutu, B - hydrostatycznym wyciskaniu drutu

Drut ciągniony, przed wejściem do ciągnadła nie jest obciążony, wobec czego gwiazda naprężeń dla dowolnego przekroju 0-0, w tej części drutu, jest punktem /rys. 3a/.

W przekroju A-A położonym na początku stożka roboczego ciągnadła występuje naprężenie rozciągające σ_1 oraz dwa naprężenia ściskające σ_2 i σ_3 pochodzące od nacisku ciągnadła. Ze względu na ośiową symetrię ciągnadła naprężenia te są sobie równe $\sigma_2 = \sigma_3$.

W przekroju B-B, położonym bliżej wylotu ciągnadła, naprężenie rozciągające σ_1 uległo zwiększeniu.

Należy zaznaczyć, że zarówno gwiazda naprężeń w przekroju A-A, jak i B-B przedstawia stan naprężenia dla materiału znajdującego się w stanie plastycznym. W tym przypadku promień gwiazdy naprężeń jest równy $\frac{2}{3} \sigma_p$, gdzie σ_p jest granicą plastyczności materiału w rozpatrywanym przekroju. Z tego powodu promień gwiazdy naprężeń zwiększa się dla przekrojów położonych bliżej wylotu ciągnadła na skutek umacniania materiału.

Na przekroju C-C, położonym poza ciągnadłem, panuje jednoosiowe rozciąganie: $\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Łatwo wywnioskować, że na wejściu materiału do ciągnadła panuje dwuosiowe równomierne ściskanie, gdyż w przekroju tym $\sigma_1 = 0$. Na wyjściu z ciągnadła największa wartość σ_1 nie może przekraczać granicy plastyczności σ_p^k przeciągniętego

drutu. W przeciwnym przypadku materiał ulegałby odkształceniu poza ciągnadłem, co może doprowadzić do urwania ciągnionego drutu.

Na rys. 3b przedstawiono stany naprężenia w różnych miejscach wyciskanego drutu. W przekroju 0-0, przed wejściem drutu do matrycy, materiał znajduje się pod działaniem trójosiowego równomiernego ściskania:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p \quad /1/$$

Gwiazdką naprężeń odpowiadającą trójosiowemu równomiernemu ściskaniu przedstawia punkt P, położony na osi σ . Punkt ten jest odległy od początku układu współrzędnych o wartość σ_m .

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = -p \quad /2/$$

Na wejściu do matrycy osiowe naprężenie ściskające σ_1 jest równe ciśnieniu cieczy p . Naprężenie to maleje na wyjściu do wartości $\sigma_1 = 0$. Występuje tu więc stan dwuosiowego równomiernego ściskania. Promień gwiazdy naprężeń wzrasta dla przekrojów położonych bliżej wyjścia ze względu na wzrost granicy plastyczności spowodowany umocnieniem.

1.3. Obliczenie naprężeń występujących w procesie ciągnięcia i hydrostatycznego wyciskania

1.3.1. Ciągnięcie

Zarówno przy ciągnięciu, jak i hydrostatycznym wyciskaniu drutów lub prętów o przekroju kołowym, występują osiowo symetryczne stany naprężenia. W literaturze technicznej spotykamy kilka metod obliczania tego rodzaju stanów naprężeń. Ze względu na różne podejścia do rozwiązania tego zagadnienia omówimy najważniejsze z nich, znajdujące najczęściej zastosowanie w praktyce.

We wszystkich spotykanych w literaturze rozwiązaniach wprowadza się szereg założeń upraszczających. Do najważniejszych z nich należą:

1. Zasada płaskich przekrojów. Zgodnie z tą zasadą płaskie przekroje poprzeczne pręta na wejściu do ciągnadła pozostają płaskimi w czasie odkształcania.
2. Naprężenia normalne, występujące między materiałem a ścianką ciągnadła, są przyjmowane jako naprężenia główne.
3. Warunek plastyczności oparty jest na hipotezie największego naprężenia stycznego.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_p \quad /3/$$

gdzie: σ_1 - jest naprężeniem rozciągającym, prostopadłym do przekroju poprzecznego pręta, a

σ_3 - naciskiem ciągnadła na materiał.

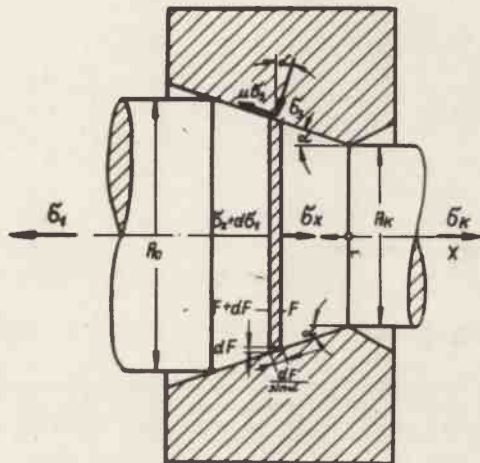
4. Tarcie występujące między materiałem a ciągnadłem określa zależność

$$\tau = \mu \sigma_3 \quad /4/$$

gdzie: μ jest współczynnikiem tarcia, którego wartość wzdłuż stożka roboczego nie ulega zmianie.

Jedno z najstarszych rozwiązań dotyczących obliczania naprężeń w procesie ciągnięcia z przeciwciągiem podał G Sachs [6]. Rozpatrzył on równowagę elementu wyciętego za pomocą dwu płaszczyzn, prostopadłych do osi pręta, odległych od siebie o odcinek dx /rys. 4/. Biorąc pod uwagę równowagę sił działających na ten element, dostaniemy

$$\sigma_x A + dA / \sigma_x + d\sigma_x / \mu \sigma_3 \frac{dA}{\sin \alpha} \cos \alpha + \sigma_3 \frac{dA}{\sin \alpha} \sin \alpha - A \sigma_3 = 0 \quad /5/$$



Rys. 4. Oznaczenie sił i przekrojów dotyczące wyprowadzenia siły ciągnięcia wg G. Sachsa [6]

W równaniu 5 występują dwie niewiadome σ_x i σ_3 . Drugie równanie wynika z warunku plastyczności 3.

$$\sigma_3 = \sigma_p - \sigma_x \quad /6/$$

Uwzględniając powyższą zależność można równanie 5 napisać w postaci

$$A d\sigma_x + [\sigma_p / 1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha / - \mu \sigma_x \operatorname{ctg} \alpha] dA = 0 \quad /7/$$

Rozdzielając zmienne σ_x i A otrzymamy

$$\frac{d\sigma_x}{\mu \sigma_x \operatorname{ctg} \alpha - \sigma_p / 1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha /} = \frac{dA}{A} \quad /8/$$

Całkując równanie 8 w granicach od A_0 do A_k oraz zakładając, że na wejściu do ciągnadła istnieje naprężenie σ_1 , dostaniemy

$$\sigma_k \int_{\sigma_1} \frac{d\sigma_x}{\mu \sigma_x \operatorname{ctg} \alpha - \sigma_p / 1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha /} = \int_{A_0}^{A_k} \frac{dA}{A}$$

$$\frac{1}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \ln \left| \frac{\mu \bar{\sigma}_x \operatorname{ctg} \alpha - \bar{\sigma}_p / (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)}{-\bar{\sigma}_p / (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} \right|_{\bar{\sigma}_1}^{\bar{\sigma}_k} = \ln \frac{A_k}{A_0}$$

stąd zaś

$$\frac{\mu \bar{\sigma}_k \operatorname{ctg} \alpha - \bar{\sigma}_p / (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)}{\bar{\sigma}_1 \mu \operatorname{ctg} \alpha - \bar{\sigma}_p / (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} = \left(\frac{A_k}{A_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha}$$

Po prostych przekształceniach otrzymamy

$$\bar{\sigma}_k - \bar{\sigma}_p \frac{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_k}{A_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] + \bar{\sigma}_1 \left(\frac{A_k}{A_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /9/$$

Z zależności 9 wynika, że naprężenie przeciwciągu o wartości $\bar{\sigma}_1$ wywołuje wzrost naprężenia na wyjściu materiału z ciągnadła mniejszy od $\bar{\sigma}_p$. Jest to wywołane zmniejszeniem się nacisku ciągnadła na materiał, co w następstwie powoduje zmniejszenie sił tarcia.

Przyjmując, że wartość wyrażenia

$$\mu \operatorname{ctg} \alpha \cong 1 \quad /10/$$

oraz oznaczając

$$1 - \frac{A_k}{A_0} = z,$$

gdzie z jest miarą odkształcenia, wzór 4 przyjmuje postać

$$\bar{\sigma}_k = 2 \bar{\sigma}_p z + \bar{\sigma}_1 \frac{A_k}{A_0} \quad /11/$$

Wzór ten dający przybliżone wartości stosowany jest bardzo często w praktyce ze względu na swą prostą budowę.

Przy wyprowadzeniu zależności 9 pominięto zupełnie dodatkowe odkształcenia postaciowe, związane z dwukrotnym przegięciem, jakiego doznaje materiał na wejściu i wyjściu z matrycy /rys. 5/. Te dodatkowe odkształcenia zostały uwzględnione w obliczeniach wykonanych przez F. Körbera i A. Eichingera [7]. Autorzy ci wzięli pod uwagę pracę odkształcenia warstwy I i II, obejmujące odkształcenia postaciowe na wejściu i wyjściu materiału z ciągnadła. Praca potrzebna dla odkształcenia elementarnego pierścionka położonego w warstwie I, o szerokości b , promieniu r i grubości dr wyniesie:

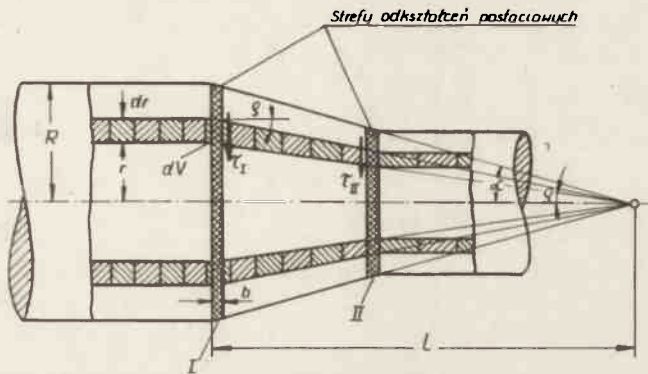
$$dL_I = w \int_{\varphi} dV \quad /12/$$

gdzie: w - jest procą właściwą odkształcenia plastycznego materiału rozpatrywanego pierścionka w strefie I, wywołaną przegięciem włókien o kącie φ .

Przed wejściem do ciągnadła przekrój poprzeczny elementarnego pierścionka jest prostokątem /rys. 5/, zaś w strefie I staje się równoległobokiem o kącie pochylenia φ . Przy takim sposobie odkształcenia praca właściwa wynosi:

$$W\varphi_I = l_I \operatorname{tg} \varphi \quad /13/$$

Przy czym $\operatorname{tg} \varphi = \frac{r}{l_I}$



Rys. 5. Strefy odkształceń postaciowych przy przeciąganiu pręta

Natomiast objętość rozpatrywanego pierścionka

$$dV = 2\pi r b dr \quad /14/$$

Podstawiając wyrażenia 13 i 14 do zależności 12 dostaniemy

$$dL\varphi_I = \frac{2\pi b}{1} \tau_I r^2 dr$$

o po scałkowaniu

$$L_I - \frac{2\pi b}{1} \tau_I \int_0^R r^2 dr = \frac{2\pi b}{31} \tau_I R^3 \quad /15/$$

Praca właściwa odkształcenia plastycznego zmienia swoje wartości wzdłuż promienia. Na osi drutu jest równa zero, natomiast wartość maksymalną osiąga dla warstw zewnętrznych gdzie $\varphi = \alpha$. Znając całkowitą pracę odkształcenia warstwy I wyrażoną wzorem /15/ oraz objętość tej warstwy $V = \pi R^2 b$, można wyznaczyć średnią wartość pracy właściwej W_I dla całej warstwy.

$$W_I = \frac{L_I}{V_I} \quad /16/$$

Podstawiając wyrażenie 15 otrzymamy

$$W_I \alpha_I = \frac{2\tau_I R}{31}$$

Jeżeli przyjąć $\frac{R}{L} = \tan \alpha$, to

$$W_I = \frac{2}{3} \tau_I \tan \alpha \quad /17/$$

W podobny sposób znajdujemy pracę odkształcenia postaciowego w strefie II znajdującej się na wyjściu z ciągnadła

$$W_{II} = \frac{2}{3} \tau_{II} \tan \alpha$$

Całkowita praca właściwa odkształcenia postaciowego W przy przemieszczeniu materiału przez strefę I i II jest sumą obu prac właściwych

$$W\alpha = W_I + W_{II} = \frac{4}{3} \operatorname{tg} \alpha \frac{\tau_I + \tau_{II}}{2}$$

$$W\alpha = \frac{4}{3} \operatorname{tg} \alpha \tilde{\tau}_{sr} \quad /18/$$

Naprężenie zastępcze dla stanu naprężeń panującego w warstwie I i II obliczone na podstawie hipotezy Hubera wynosi:

$$\tau_{sr} = \frac{\sigma_{psr}}{\sqrt{3}}$$

Wobec czego

$$W\alpha = 0,77 \sigma_{psr} \operatorname{tg} \alpha \quad /19/$$

Dodatkowa praca właściwa odkształcenia $W\alpha_k$ powoduje przyrost naprężenia ciągnącego.

Uwzględniając ją otrzymamy

$$\tilde{\sigma}_k = \tilde{\sigma}_{psr} / \mu + \frac{1}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_k}{A_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] + 0,77 \sigma_{psr} \operatorname{tg} \alpha + \tilde{\sigma}_1 \left(\frac{A_k}{A_0} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /20/$$

Ponieważ wartość kąta α wynosi około 6° / $\operatorname{tg} \alpha = 0,1$ /, to z zależności 20 wynika, że uwzględnienie odkształceń postaciowych, pochodzących od gięcia włókien przeciąganego drutu lub pręta, zwiększa wartość naprężenia ciągnącego o

$$\Delta \tilde{\sigma}_k = 0,077 \sigma_{psr} = 0,08 \sigma_{psr} \quad /21/$$

Badania wykazują, że zależność 9, podana przez G. Sachsa, daje заниżone wartości naprężenia ciągnięcia. Uwzględnienie odkształceń postaciowych zginanych włókien pozwala znacznie zmniejszyć różnicę pomiędzy wyliczonymi a znalezionymi doświadczalnie wartościami naprężenia ciągnącego.

1.3.2. Hydrostatyczne wyciskanie

Schemat stanu naprężeń panujący w procesie hydrostatycznego wyciskania różni się od zwykłego przepychania tylko w odniesieniu do części pręta znajdującej się przed stożkiem kształtującym. Przy hydrostatycznym wyciskaniu, w tej części pręta, występuje trójosiowe równomierne ściskanie $\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3 = -p$ /rys. 6a/, natomiast przy przepychaniu - jednoosiowe ściskanie /rys. 6b/. Natomiast w strefie kształtowania i po opuszczeniu matrycy schematy stanów naprężeń są identyczne.

Ze względu na występującą pełną zgodność schematów stanów naprężeń w obu tych procesach dla obliczenia sił występujących przy hydrostatycznym wyciskaniu można posługiwać się związkami opracowanymi dla procesu przepychania.

Podstawową zaletą hydrostatycznego wyciskania jest brak ograniczeń jakie istnieją przy przepychaniu, przy którym musi być zachowana zależność $\tilde{\sigma}_1 < \tilde{\sigma}_0$.

Dla obliczenia naprężeń w procesie przepychania wyjdziemy z zależności 8, uwzględniając przy całkowaniu zmianę warunków brzegowych.

W tym przypadku na wejściu do matrycy występuje naprężenie ściskające σ_c^0 . Dla bardziej ogólnego przypadku przepychania z ciągnięciem przyjmujemy, że na wyjściu z matrycy istnieje naprężenie rozciągające σ_k . Całkując wyrażenie /8/ w podanych granicach dostaniemy:

$$\sigma_c^k \int_{\sigma_c^0}^{\sigma_k} \frac{d\sigma_x}{\mu \sigma_x \operatorname{ctg} \alpha - \sigma_p / (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} = \int_{A_0}^{A_k} \frac{dA}{A} \quad /22/$$

Wobec czego naprężenie przepychania wyrazi się zależnością

$$\sigma_c = \frac{\sigma_k}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] + \sigma_k \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /23/$$

Uwzględniając odkształcenie wywołane przeginiem włókien zależność /23/ przyjmie postać

$$\sigma_c = \frac{\sigma_k}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] - 0,77 \operatorname{tg} \alpha + r \sigma_k \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /23a/$$

Zależność /23/ można rozdzielić na dwa człony A i B, z których pierwszy

$$A = \frac{\sigma_k}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] - 0,77 \operatorname{tg} \alpha \quad /23b/$$

przedstawia naprężenie przepychania idące na wywołanie odkształceń plastycznych i pokonanie oporów tarcia.

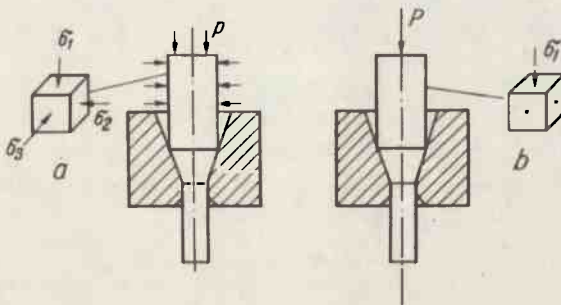
Człon drugi

$$B = \sigma_k \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /23c/$$

przedstawia wartość, o jaką zmniejsza się naprężenie przepychania, w przypadku obecności naprężenia rozciągającego σ_k , na wyjściu drutu z matrycy.

Należy wziąć pod uwagę, że przy całkowaniu zależności /22/ przyjęto stałą wartość granicy plastyczności σ_p .

W rzeczywistości, dzięki występującemu umocnieniu, σ_p wzrasta od wartości początkowej σ_p^0 na wejściu do matrycy do wartości σ_p^k na wyjściu z matrycy.



Rys. 6. Schematy stanów naprężeń: a - hydrostatyczne wyciskanie, b - przepychanie

Przyjmując zależność opisującą krzywą umocnienia w postaci

$$\bar{\sigma}_p = c \psi^n \quad /24/$$

można wstawiając tę wartość do zależności /22/ uwzględnić efekt umocnienia. Ujęcie takie uniemożliwiłoby rozwiązanie całki, co skomplikowałoby dalsze rozważania dotyczące wpływu różnych parametrów na wartość naprężenia przepychania.

Dla ominięcia tej trudności wyznaczono średnią wartość $\bar{\sigma}_{psr}$, przyjmując wartość $\bar{\sigma}_p$ zgodnie z zależnością /24/.

Dostaniemy wówczas

$$\bar{\sigma}_{psr} = \frac{\int_0^{\psi} \bar{\sigma}_p d\psi}{\psi} = \frac{\int_0^{\psi} c \psi^n d\psi}{\psi} = \frac{c \psi^{n+1}}{\psi(1+n/\varphi)} = \frac{c \psi^n}{1+n} = \frac{\bar{\sigma}_p^k}{n+1} \quad /25/$$

Tak wyliczoną wartość średnią należy wprowadzić do członu A przedstawionego w zależności /23b/. Natomiast wartość naprężenia ciągnienia $\bar{\sigma}_k$ występującego w zależności /23c/ należy uzależnić od końcowej wartości granicy plastyczności

$$\bar{\sigma}_p^k \text{ w postaci} \quad \bar{\sigma}_k = r \bar{\sigma}_p^k$$

gdzie $r < 1$ charakteryzuje w jakim stopniu, w wyniku przyłożonej siły ciągnącej, został wyjęzony wyciskany drut w stosunku do posiadanej granicy plastyczności.

Przy tych założeniach wartość naprężenia przepychania przedstawiona w zależności /23a/ przyjmie postać

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\bar{\sigma}_p^k}{n+1} \left\{ \frac{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha}{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] - 0,77 \operatorname{tg} \alpha \right\} + r \bar{\sigma}_p^k \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \quad /26/$$

Biorąc pod uwagę, że $A_0 > A_k$, wyrażenie

$$\left[1 - \left(\frac{A_0}{A_k} \right)^{\mu \operatorname{ctg} \alpha} \right] - 0,77 \operatorname{tg} \alpha$$

jak i cały człon A ma wartość ujemną. Człon A przedstawia wartość naprężenia przepychania bez ciągnienia, tj. gdy $\bar{\sigma}_k = 0$.

Natomiast drugi człon B wchodzący w skład naprężenia przepychania jest wartością dodatnią, wskutek czego obecność naprężenia rozciągającego $\bar{\sigma}_k$ wpływa na zmniejszenie naprężenia przepychania.

2. PRZEDSTAWIENIE CIĄGNIENIA I HYDROSTATYCZNEGO WYCISKANIA NA WYKRESIE WYTĘŻENIOWYM

Różnice występujące między stanami naprężeń w procesach ciągnienia i hydrostatycznego wyciskania najlepiej można wykazać porównując przebieg obu procesów na wykresie wyężeniowym we współrzędnych $\bar{\sigma}_m \div \bar{\sigma}_{II}$. Warunek plastyczności

$\bar{\sigma}_H = \bar{\sigma}_p$ na tego rodzaju wykresie wyężeniowym przedstawia prosta pozioma odpowiadająca granicy plastyczności $\bar{\sigma}_p^0$.

2.1. Ciągnienie

Dla przedstawienia procesu ciągnienia wyznaczmy odpowiadające mu wartości σ_m i σ_H . Zgodnie z rys. 3a, w dowolnym przekroju położonym wewnątrz stożka roboczego występują naprężenia $\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 < 0$. Związki między tymi naprężeniami można ustalić z warunku plastyczności

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_p$$

Stąd otrzymamy

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \left(\sigma_1 - \frac{2}{3} \sigma_p \right)$$

Średnie naprężenie

$$\sigma_m = \sigma_1 - \frac{2}{3} \sigma_p \quad /27/$$

Ze względu na spełniony warunek plastyczności naprężenie zastępcze wynosi

$$\sigma_H = \sigma_p$$

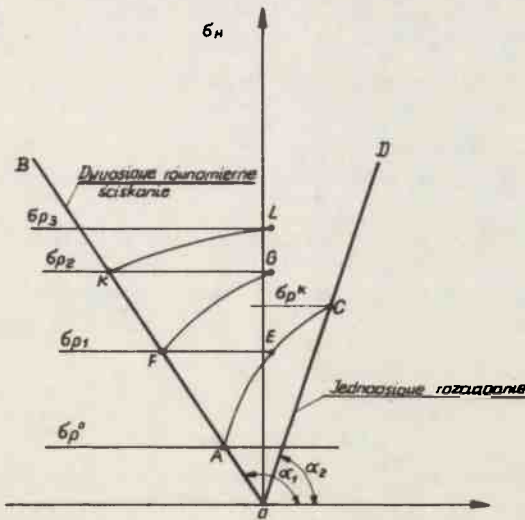
Położenie prostej, przedstawiającej na rys. 7 stan naprężeń panujący w rozpatrywanym przekroju, możemy obliczyć z zależności

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\sigma_m}{\sigma_H} = \frac{\sigma_1 - \frac{2}{3} \sigma_p}{\sigma_p} = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} - \frac{2}{3} \quad /28/$$

W przypadku ciągnienia bez przeciwciągu na wejściu do ciągnadła $\sigma_1 = 0$. Wynika stąd, że

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = -\frac{2}{3} \quad /29/$$

co odpowiada dwuosowemu równomiernemu ściskaniu.



Rys. 7. Stany naprężenia występujące przy ciągnieniu drutu przez kolejne ciągnadła

Na rys. 7 przypadek ten przedstawia prosta OB, a stan naprężenia panujący na wejściu do ciągnadła jest scharakteryzowany przez współrzędne punktu A położonego na przecięciu się prostej OB z prostą $\bar{\sigma}_p$, odpowiadającą granicy plastyczności materiału wyjściowego.

W miarę przesuwania się rozpatrywanego przekroju w kierunku wylotu z matrycy zwiększa się wartość naprężenia ciągnącego $\bar{\sigma}_1$. Równocześnie pod wpływem zachodzących odkształceń wzrasta granica plastyczności ciągniętego materiału, co powoduje wzrost $\bar{\sigma}_{11}$. Jak już o tym była mowa, wartość naprężenia $\bar{\sigma}_1$ nie może na wyjściu z ciągnadła przekroczyć granicy plastyczności przeciągniętego drutu $\bar{\sigma}_p^k$, gdyż to wywołałoby jego odkształcenie poza ciągnadłem.

Zakładając, że $\bar{\sigma}_1$ osiąga wartość $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_p^k$ i podstawiając do wzoru /28/ otrzymamy:

$$\operatorname{ctg} \alpha_2 = 1 - \frac{2}{3} = \frac{1}{3} \quad /30/$$

Wartość ta odpowiada jednoosiowemu rozciąganiu.

Przypadek ten przedstawia na rys. 7 prosta OD, o stan naprężenia na wyjściu z ciągnadła punkt C. Punkt C położony jest na prostej $\bar{\sigma}_p$ odpowiadającej granicy plastyczności, jaką posiada materiał przy odkształceniu granicznym.

Stany naprężenia na przekrojach pośrednich drutu przedstawia krzywa AEC. Na ogół wartość odkształcenia dobieramy tak, by końcowy punkt przedstawiający stan naprężenia na wyjściu z ciągnadła leżał w pobliżu osi $\bar{\sigma}$, np. w punkcie E.

W przypadku ciągnięcia drutu przez następne kolejne ciągnadło stan naprężenia na wejściu przedstawiać będzie punkt F, a cały przebieg procesu krzywa FG.

Podobnie następne kolejne ciągnięcie przedstawia następną krzywą KL itd.

Z rys. 7 widzimy, że występujące w procesie klasycznego ciągnięcia naprężenie rozciągające $\bar{\sigma}_1$ stale wzrasta w kolejnych ciągnadłach. Zwiększa to coraz bardziej niebezpieczeństwo pęknięcia ciągniętego drutu i równocześnie zmusza do stopniowego zmniejszania odkształceń w kolejnych operacjach. Przy bardzo cienkich drutach zachodzi konieczność stosowania bardzo dużej liczby operacji.

Krzywe przedstawiające na rys. 7 przebieg naprężeń w kolejnych ciągnadłach są coraz mniej nachylone do osi $\bar{\sigma}_m$. Jest to spowodowane coraz mniejszym przyrostem granicy plastyczności zachodzącym w kolejnych ciągnadłach.

2.2. Wyciskanie hydrostatyczne

Stany naprężenia dla przypadku wyciskania hydrostatycznego przedstawiono na rys. 3b.

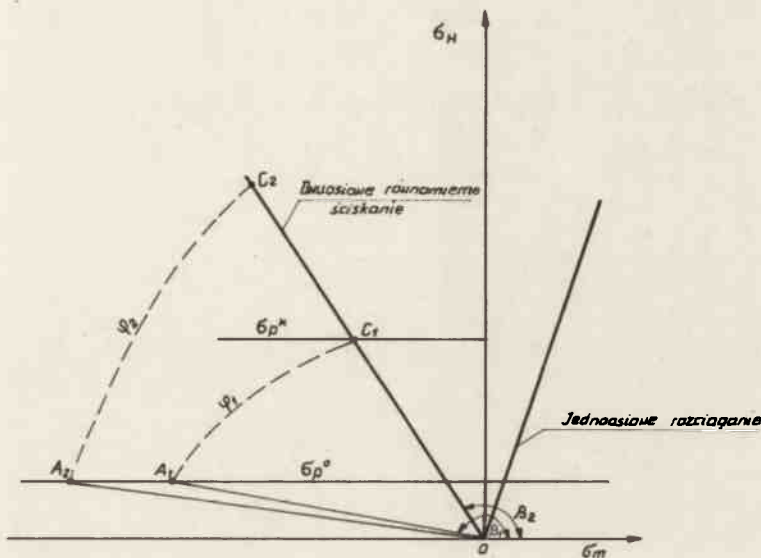
Wartość naprężenia $\bar{\sigma}_1$ na wejściu do matrycy, a zarazem ciśnienia wywołującego wpływ materiału, zależy od parametrów procesu występujących w równaniu /26/.

Na rys. 8 pokazano prostą OA₁ przedstawiającą obciążenie na wejściu materiału do matrycy. Kąt β_1 odpowiadający tej prostej można wyliczyć również z zależności 29 uwzględniając, że:

$$\bar{\sigma}_1 = -p$$

dostaniemy wówczas

$$\operatorname{ctg} \beta_1 = \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_0} = -\frac{2}{3} = -\frac{p}{\bar{\sigma}_p} = -\frac{2}{3} \quad /31/$$



Rys. 8. Stany naprężenia występujące przy hydrostatycznym wyciskaniu drutu z różnymi wartościami odkształcenia ψ

Krzywa przedstawiająca stany naprężenia w procesie wyciskania /rys. 8/ wychodzi z punktu A_1 leżącego na przecięciu prostej b_p^0 , odpowiadającej granicy plastyczności materiału wchodzącego do matrycy, z prostą OA_1 nachyloną pod kątem β_1 .

Prosta OC na rys. 8 charakteryzuje stan naprężenia no wyjściu materiału z matrycy. W tym przypadku mamy

$$\sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = \sigma_3$$

Położenie prostej OC możemy wyliczyć z zależności 29 zakładając

$$\sigma_1 = 0$$

- dostaniemy wówczas

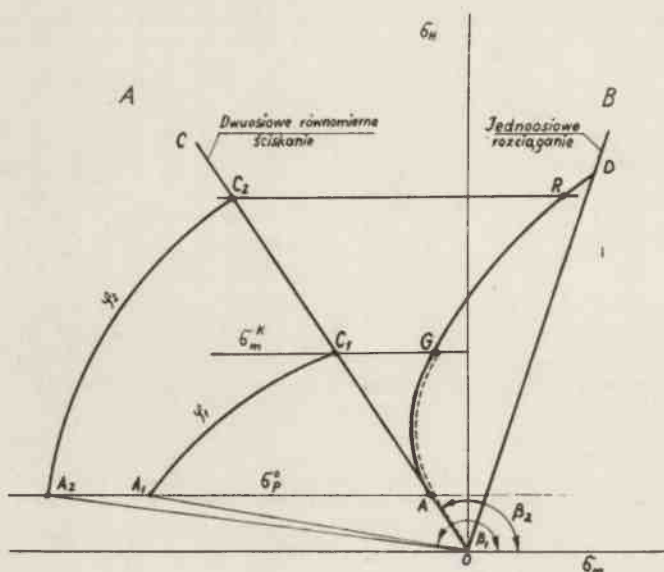
$$\operatorname{ctg} \beta_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_p} - \frac{2}{3} = \frac{0}{\sigma_p^k} - \frac{2}{3} = -\frac{2}{3} \quad /32/$$

Z zależności /32/ wynika, że prosta OC odpowiada dwuosiowemu równomiernemu ścisnaniu.

Położenie prostej OA_1 oraz prostej b_p^k zależą od wartości odkształcenia, jakiego doznaje materiał w pierwszej operacji procesu wyciskania.

3. PORÓWNANIE PROCESÓW

Na rys. 9 przedstawiono schematycznie zmianę naprężeń zachodzącą wzdłuż osi matrycy dla dwóch różnych odkształceń ψ_1 i ψ_2 w procesie przeciągania oraz hydrostatycznego wyciskania.

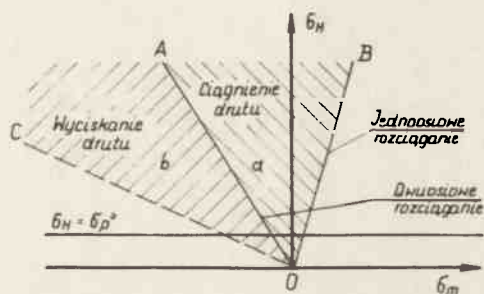


Rys. 9. Porównanie stanów naprężenia występujących w procesie hydrostatycznego wyciskania /część wykresu b/ oraz przeciągania /część wykresu a/

Odształceniu $\bar{\gamma}_1$ odpowiada w procesie ciągnięcia krzywa kreskowana OAG, a przy hydrostatycznym wyciskaniu krzywa OA_1C_1 . Odształceniu $\bar{\gamma}_2$ odpowiada przy ciągnięciu krzywa OAGR, a przy hydrostatycznym wyciskaniu krzywa OA_2C_2 . Należy zwrócić uwagę, że przy ciągnięciu krzywa OAGR odpowiadająca większemu odkształceniu $\bar{\gamma}_2$ przebiega w swej początkowej części OAG zgodnie z kreskowaną krzywą odpowiadającą odkształceniu $\bar{\gamma}_1$. Z rysunku 9 widzimy, że krzywe A_1C_1 i A_2C_2 przedstawiające stany naprężenia występujące w procesie hydrostatycznego wyciskania są znacznie przesunięte w kierunku wysokich wartości ciśnienia hydrostatycznego w porównaniu do krzywej AGRD odpowiadającej przeciąganiu. Przy największych nawet odkształceniach stany naprężenia w wyciskanym materiale nie przekraczają prostej OAC_1C_2 odpowiadającej dwuosiowemu ścisnieniu.

Należy zaznaczyć, że w miarę zwiększającego się odkształcenia punkt C_1 , przedstawiający stan naprężenia na wyjściu materiału z matrycy, przesuwają się wzdłuż linii OC w stronę wyższych wartości ciśnienia hydrostatycznego, co zmniejsza niebezpieczeństwo powstania pęknięć.

Na rys. 10 przedstawiono na wykresie wyężeniowym we współrzędnych $\bar{\sigma}_m \div \bar{\sigma}_H$ pola, w których znajdują się naprężenia występujące w procesie ciągnięcia - obszar a, oraz hydrostatycznego wyciskania - obszar b. Z wykresu tego wynika, że w procesie ciągnięcia jedynie na wejściu do matrycy /prosto OA/ nie występują naprężenia rozciągające. Natomiast w matrycy naprężenia te szybko rosną i przy większych odkształceniach mogą osiągnąć wartości graniczne, odpowiadające jednoosiowemu rozciąganiu /prosta OB/, co z reguły doprowadza do odkształcenia, a następnie do zerwania.



Rys. 10. Pola naprężeń odpowiadające procesowi ciągnięcia oraz hydrostatycznego wyciskania na wykresie wyteżeniowym we współrzędnych $\sigma_m - \sigma_H$

W przypadku natomiast procesu hydrostatycznego wyciskania na wejściu do matrycy występuje trójosiowe ściskanie o dużej wartości ciśnienia hydrostatycznego – prosta OC. Naprężenie osiowe, równe na wejściu do matrycy ciśnieniu wypływu, maleje w miarę przemieszczenia materiału przez ciągnadło i na wyjściu spada do zera /prosta OA/.

Wobec braku w procesie wyciskania naprężeń rozciągających nie istnieje obawa pęknięcia drutu. Jest to najcenniejsza zaleta procesu wyciskania umożliwiająca wyrób drutów o najmniejszych średnicach.

Literatura

1. Bridgeman P.W.: Studies in large plastic flow and fracture of solida. New York 1952
2. Bieresniew B.T., Wereszczagin L. F., Pjabinin J. N.: Rol sriedy pri wydawliwanii mietalłow zidkost;u wysokowo dawlienija Izwiestija Akademii Nauk CCCR Otdielenije tiechniczeskich Nauk N-IV 1958
3. Pugh H. Li. D., Wilkinsos P.T., Hodge M.H.: Machine for the hydrostatic extrusion-drawing of wire "Proc. Inst. Mech. Eng." 1972, 186. No 44, pp 499-507. III /ang./
4. Lengyel B. Alexander I.M.: The potential of hydrostatic extrusion-drawing in the production of high strength wire
5. Parsons B., Bretherton and Cole B.W.: A preliminary investigation of the combined hydrostatic extrusion and drawing process, Pergamon Press - Oxford - New York 1969
6. Sachs Z.: f. angew. Math. Mech 7 /1927/ S 235/36
7. Kärber F. i Eichinger A. Mitl. Wilh. K. : - Inst. f. Eisenforsch. 1940 s 57/80
8. Lange K.: Lehrbuch der Umformtechnik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1975 t. 3 str. 138
9. Buriak V.P.: Hydrostatičeskoje pressowanie powołaki Cvet, Metally 1974
10. Bieresniew B.J. i autorzy.: Płasticznost i procznost twierdych tiet pri wysokich dawlienijach. Izdatielstwo Nauka Moskwa 1970