

# K O M U N I K A T Y

## DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA TEORII OBLICZEŃ SIŁ W PROCESIE WYCISKANIA

JAN PIWNIK (BIAŁYSTOK)

Praca zawiera porównanie teoretycznych i doświadczalnych wartości bezwymiarowego ciśnienia normalnego na tłoku w procesie wyciskania cylindrycznego pręta przez matryce stożkowe. Wyniki obliczeń uzyskane metodą charakterystyk zaczerpnięto z pracy [12]. Ocenę górną wzięto z prac [4, 5 i 15], a dolną z pracy [13]. Do wiadczenia wykonano przy pięciu zmiennych parametrach procesu wyciskania dwuczęściowych próbek z PA2. Zbudowano do tego celu specjalne stanowisko. Porównanie wyników wskazuje na bliską zgodność do wiadczenia z oceną górną bez tarcia. Bliższe rozwiązania ścisłego są te wartości ciśnień, do obliczenia których wartość granicy plastyczności na ścinanie brano z warunku plastyczności Hubera-Misesa przy zaawansowanym odkształceniu. Zwrócono uwagę na niejednoznaczność interpretacji doświadczenia i teorii idealnej plastyczności. Spowodowane to jest trudnościami z określeniem granicy plastyczności materiału znajdującego się w obszarze uplastycznienia.

### 1. UWAGI OGÓLNE

Znajomość sił w procesie współbieżnego wyciskania cylindrycznego pręta przez matryce stożkowe jest podstawą analizy technicznej tego procesu. Problem ten jest również aktualny naukowo ze względu na poważne luki w teorii plastycznego płynięcia przy rozwiązywaniu zagadnień z mieszanymi warunkami brzegowymi. Temat ten był przedmiotem wielu monografii i publikacji poświęconych plastycznemu formowaniu metali [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 i 15]. Najczęściej podawano empiryczne wzory na siły oraz wyrażenia otrzymane z rozwiązań opartych na bardzo silnych uproszczeniach kształtu strefy deformacyjnej i własności materiału. Zakłada się w nich np., że materiał jest idealnie plastyczny, a przyjęty w początkowej fazie procesu płaski lub sferyczny przekrój pozostaje taki sam w ciągu całego procesu [2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14 i 15]. Uproszczone metody obliczeń, z braku innych, są ciągle punktem wyjścia w obliczeniach inżynierskich. Metody te były też częściowo weryfikowane doświadczalnie [2, 3 i 15].

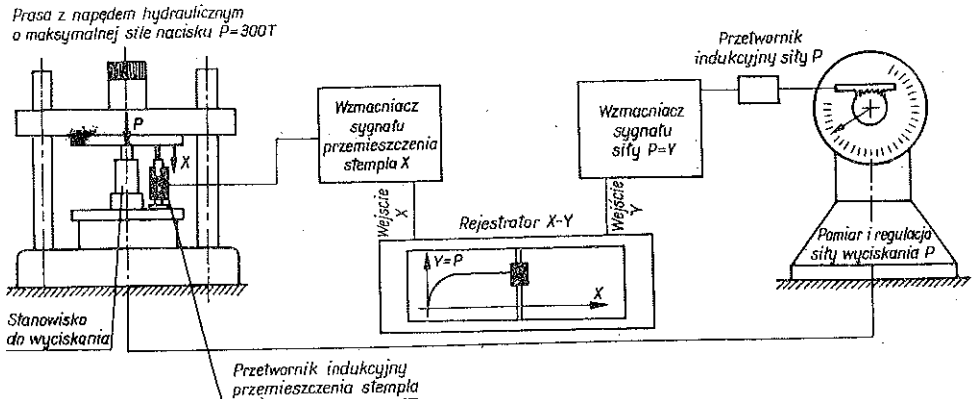
Odczuwa się jednak brak prac doświadczalnych poświęconych weryfikacji najnowszych rozwiązań zagadnień mechaniki złożonego procesu wyciskania. Obecnie można odnotować szereg prób uzyskania rozwiązań zagadnień z mieszanymi warunkami brzegowymi w osiowej symetrii [9 i 12]. Rozwiązania te otrzymano numerycznie metodą charakterystyk [8, 9 i 12] na gruncie matematycznej teorii plastycznego płynięcia. Teoria ta umożliwia racjonalną analizę tych procesów. Na przykład

za pomocą twierdzeń ekstremalnych teorii plastyczności są doskonalone energetyczne metody obliczeń [4, 5 i 15] procesów obróbki plastycznej.

Poniżej zostanie podana doświadczalna weryfikacja wyników teoretycznych otrzymanych metodą charakterystyk [12], metodą założenia funkcji rozkładu prędkości [4, 5 i 15] i metodą uproszczoną [13]. Szczegółowa dyskusja tych zagadnień jest przedstawiona w pracy [10].

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania wykonano w temperaturze normalnej na przyrządzie własnej konstrukcji z dwuczęściową komorą, w której umieszczono próbki złożone z dwóch półcylicydrycznych połówek [10]. Próbki wykonano ze stopu aluminium PA2 i były one przed wyciskaniem wyżarzone. Do ciągłej rejestracji przemieszczania stempla i wartości siły zastosowano układ pomiarowy według schematu blokowego, rys. 1 [10]. Po wyciśnięciu na płaszczyźnie podziału próbek dokonano pomiary twardości które poprzedzono gładzeniem powierzchni i sporządzeniem wykresu twardości w zależności od intensywności naprężeń  $H=H(\sigma_t)$  [10]. Miało to na celu zbadanie średniej granicy plastyczności w obszarze uplastycznienia. Wartość  $\sigma_t$  oceniano niezależnie z wykresu intensywności naprężeń jako funkcji intensywności odkształceń  $\sigma_t = \sigma_t(\epsilon_t)$ , który uzyskano z prób jednoosiowego ściskania walców cylindrycznych, wykonanych z tego samego materiału co próbki wyciskane.



Rys. 1

Zastosowano następujące parametry procesu:

- 1)  $\frac{D}{d} = \frac{70}{58}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $R = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 = 0,35$ ;
- 2)  $\frac{D}{d} = \frac{50}{33}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $R = 0,57$ ;
- 3)  $\frac{D}{d} = \frac{50}{18}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $R = 0,88$ ;

$$4) \quad \frac{D}{d} = \frac{50}{18}, \quad \alpha = 45^\circ, \quad R = 0,88;$$

$$5) \quad \frac{D}{d} = \frac{50}{18}, \quad \alpha = 60^\circ, \quad R = 0,88,$$

przy czym  $D$  [mm] oznacza średnicę początkową,  $d$  mm średnicę po redukcji  $\alpha$  kąt nachylenia tworzącej otworu matrycy oraz  $R$  stopień redukcji.

Proces prowadzono bez smarowania, ale z wysoką gładkością na powierzchni styku narzędzia i materiału. Średnia prędkość ruchu postępowego tłoka wynosiła 2 mm/min. Łącznie wyciśnięto 30 próbek. Dalej będą pokazane reprezentatywne wyniki dla pięciu próbek.

### 3. PORÓWNANIE WYNIKÓW DOŚWIADCZENIA I TEORII

#### 3.1. Uwagi o wynikach teoretycznych

Przy porównywaniu wyników siły zastąpiono bezwymiarową liczbą  $q/2k$ . Wyraża ona stosunek średniego ciśnienia normalnego ( $q$ ) na tłoku do umownej granicy plastyczności na ścinanie materiału ( $k$ ).

Wartości teoretyczne  $q/2k$  uzyskane metodą charakterystyk zaczerpnięto z pracy [12]. Zastosowano tam metodę kolejnych iteracji. Zakładano rozkład naprężeń normalnych na konturze matrycy i sprawdzano każdorazowo zgodność z warunkami kinematycznymi. Otrzymane tam wartości  $q/2k$  nazwano umownie ścisłymi, ponieważ wykonano przedłużenia pól naprężeń w obszar sztywny.

Praca [12] jest jedną z nielicznych prób rozwiązania tak trudnego problemu i ilustruje wszystkie trudności dotyczące sposobu usunięcia nieciągłości prędkości na charakterystykach ograniczających obszar uplastycznienia.

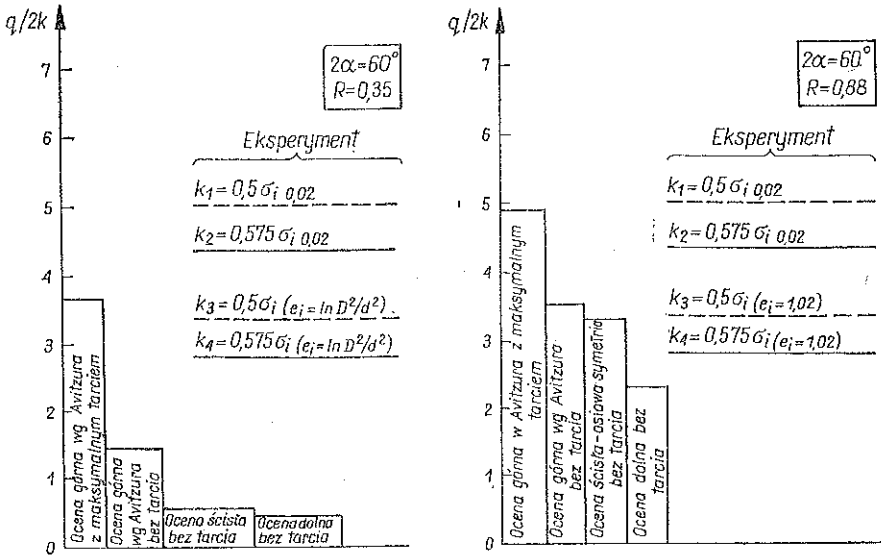
Górną ocenę  $q/2k$  otrzymano z założonego, kinematycznie dopuszczalnego pola prędkości w obszarze uplastycznienia. Wykorzystano tu wyniki prac B. AVITZURA [4, 5, i 15], który stosował biegunowy schemat płynięcia.

Statystycznie dopuszczalny stan naprężeń daje rozwiązanie na dolną ocenę  $q/2k$ . Oszacowania dolne są wystarczająco przeanalizowane w pracy [13].

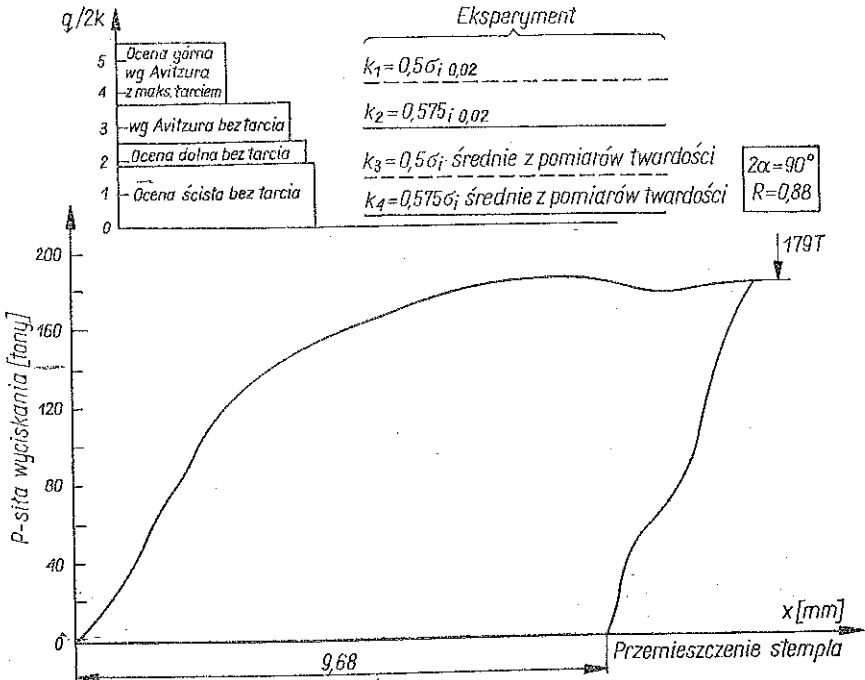
#### 3.2. Zestawienie wyników doświadczeń i teorii

W doświadczeniu pewną trudność sprawiało ustalenie wartości granicy plastyczności materiału znajdującego się w obszarze uplastycznienia. W związku z tym przyjmowano cztery różne wartości  $k$  celem porównania obliczeń z wynikami doświadczeń. Wartość  $k_1$  brano z krzywej intensywności naprężeń  $\sigma_i = \sigma_i(\epsilon_i)$  dla  $\epsilon_i = 0,02$ . Obliczono ją według warunku plastyczności Treski, w więc z zależności  $k_1 = 1/2\sigma_{p1}$ . Wartość  $k_2$  obliczano dla tej samej intensywności naprężeń  $\sigma_1$ , ale z warunku plastyczności Hubera-Misesa  $k_2 = 1/\sqrt{3}\sigma_{p1}$ . Pozostałe wartości  $k_2$  i  $k_4$  obliczano na podstawie średniej intensywności naprężeń  $\sigma_i$ , którą uzyskano z pomiarów pól twardości w obszarze uplastycznienia [10]. Wykorzystano jak poprzednio dwa warunki plastyczności, tj. z warunku Treski obliczano  $k_3$  i z warunku Hubera-Misesa  $k_4$ .

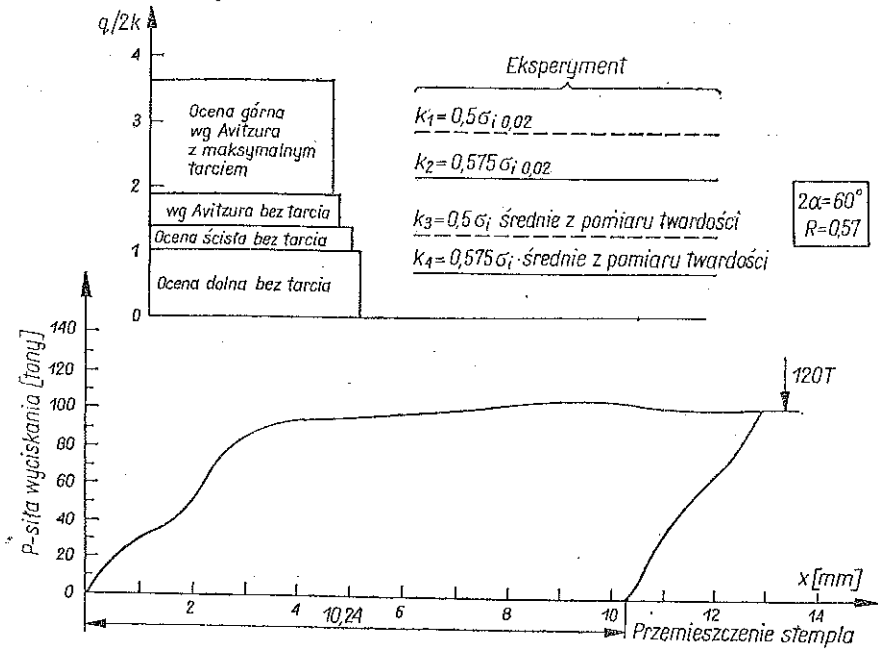
Stąd każdej próbce przyporządkowano cztery doświadczalne wartości bezwymiarowego ciśnienia  $q/2k$ . Te ciśnienia, do obliczeń których  $k_3$  i  $k_4$  brano z pól twardości, uwzględniają w przybliżeniu wpływ wzmocnienia. Uwaga ta jest poprawna również w przypadku, gdy  $k_3$  i  $k$  brano z krzywej umocnienia w punkcie  $e_1 = \ln D/d^2$ .



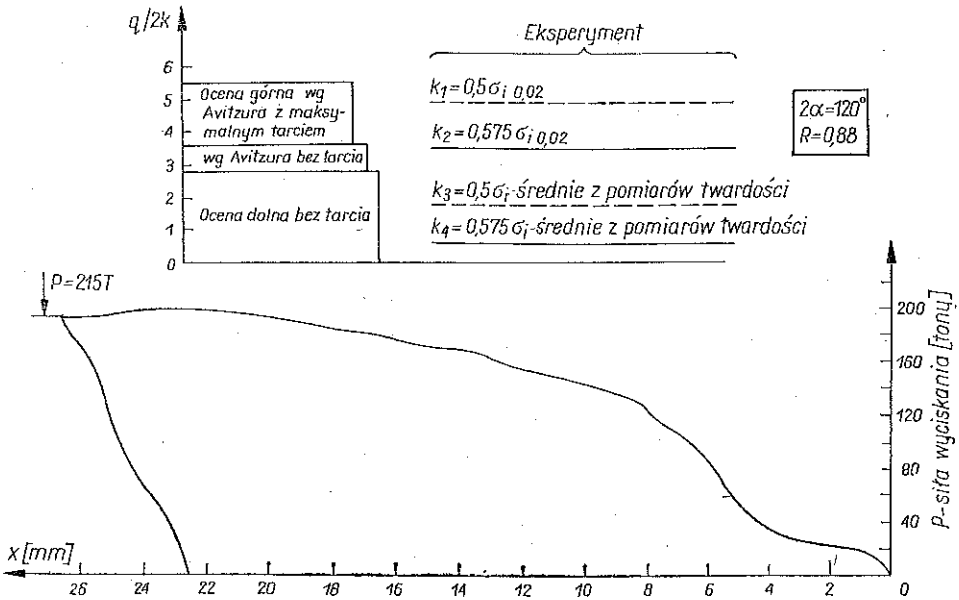
Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5

Rysunki od 2 do 5 przedstawiają wzajemne położenie obliczeniowych i doświadczalnych ciśnień  $q/2k$  oraz wykresy siły wyciskania ( $P$ ) jako funkcji przemieszczenia stempla ( $X$ ). Punkty doświadczalne lokowały się pomiędzy oceną ścisłą [12] i górną [4, 5 i 15]. Bliższe rozwiązania ścisłego są te wyniki, w których

$k$  brano z warunku plastyczności Hubera–Misesa i pół twardości. Wobec faktu, że rozwiązanie ściśle [12] przy dużych redukcjach można budować tylko przy zaokrąglonym konturze matrycy, próbka z parametrami  $\alpha=30^\circ$  i  $R=0,88$  była wyciskana przez matrycę z zaokrąglonym narożem na wejściu. Stosunek promienia zaokrąglenia do połowy średnicy zredukowanej miał taką samą wartość jak w rozwiązaniu ścisłym, tj.  $R/r_0=2,6$ . Stwierdzono tam małe różnice w położeniu teoretycznej i doświadczalnej linii  $q/2k$  odniesionej do wartości  $k_3$  i  $k_4$ .

W próbce z rys. 4 ( $2\alpha=90^\circ$ ,  $R=0,88$ ) teoretyczna linia pozioma  $q/2k$  oceny dolnej leży nad linią oceny ścisłej. Jest to spowodowane tym, że matryca nie miała w tym przypadku zaokrąglonych naroży. Obliczenia zaś metodą charakterystyk są zbudowane przy zaokrąglonym narożu. W przeciwieństwie do tego użyta tutaj metoda obliczenia oceny dolnej tego faktu nie uwzględnia.

Decydujący wpływ na przebieg procesu wywierają siły tarcia. Wynika to z charakteru przebiegu funkcji  $P=P(X)$  na rys. 3, 4 i 5. Występował tu monotoniczny wzrost siły w dużym przedziale przemieszczenia stempla ustalonej fazy wyciskania

#### 4. WNIOSKI

1. Porównanie pomiarów i obliczeń sił w procesie wyciskania cylindrycznego pręta przez matryce stożkowe wskazuje na dość dobrą zgodność wyników doświadczeń z oceną górną bez tarcia. Bliższe rozwiązania ścisłego są wyniki doświadczeń, w których średnią wartość  $k_4$  brano z warunku plastyczności Hubera–Misesa ze wzmocnieniem. Dotyczy to szczególnie dużych redukcji przekroju początkowego ( $R>0,5$ ).

2. Istotny wpływ na charakter procesu wywierają siły tarcia i wzmocnienie. Czynniki te ograniczają występujące różnice między doświadczeniem i rezultatami metody charakterystyk [12]. Różnice te w przypadku oceny górnej są głównie związane z rozbieżnościami rzeczywistych i założonych pół prędkości.

3. Przedstawiona doświadczalna weryfikacja teorii cechuje się niejednoznacznością wynikającą z trudności wyznaczenia granicy plastyczności materiału znajdującego się w niejednorodnym polu odkształceń plastycznych. Ogranicza to możliwość interpretacji wyników teorii opartych na modelu sztywno-plastycznym. Wydaje się jednak, że pomimo trudności uzyskania rozwiązań — metoda charakterystyk może być stosowana do analizy procesu wyciskania. Sprawa ta wymaga dalszych badań.

4. Doświadczalna ocena dokładności teorii obliczeń sił w procesie wyciskania jest związana z badaniami kształtu strefy deformacyjnej i zjawisk tam zachodzących. Stąd ciągle aktualność problemu i jego rozwiązanie jest jednak bardzo trudne. Dotyczy to w równym stopniu teorii i eksperymentu.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. W. A. BACKOFEN, *Deformation processing*, Massachusetts Institute of Technology, 1972.
2. W. JOHNSON, W. KUDO, *The mechanics of metal extrusion*, Manchester University Press 1962.
3. E. G. THOMSEN, C. T. YANG, S. KOBAYASHI, *Mechanics of plastic deformation in metal processing*, M. C. Millan Co., 1965.
4. B. AVITZUR, *Flow characteristics through conical converging dies*, J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, B, 88, 410-420, 1966.
5. B. AVITZUR, *Metal forming interrelation between theory and practice plenum press*, London, New York, 1971.
6. W. P. ROMANOWSKI, *Poradnik obróbki plastycznej na zimno*, WNT, Warszawa 1976.
7. C. E. PEARSON, *The extrusion of metals*, New York 1944.
8. R. HILL, *The mathematical theory of plasticity*, Oxford 1960.
9. W. SZCZEPIŃSKI, *Wstęp do analizy procesów obróbki*, PWN, Warszawa 1967.
10. J. PIWNIK, *Metody obliczeń złożonych procesów obróbki plastycznej w świetle badań doświadczalnych*, praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1979.
11. А. Д. Томленов, *Теория пластического деформирования металлов*, Металлургия, 1972.
12. Р. И. Непершия, *Осесимметричное прессование с малыми и большими обжатиями; Об. Расчёты процессов пластического течения металлов*, Наука, 1973.
13. И. Л. Пёрлин, Л. X. Рейтбарг, *Теория прессования металлов*, М. Металлургия, 1975.
14. Г. А. Смирнов Аляев, *Сопrotивление материалов пластическому деформированию*, Л. Машиностроение, 1978.
15. X. Л. Пью, *Механические свойства материалов под высоким давлением*, Изд. Мир, Москва 1973.

UNIwersytet warszawski  
FILIA W BIAŁYMSTOKU

*Praca została złożona w Redakcji dnia 19 grudnia 1979 r.*

---