

ANALIZA PROCESU WYCIĄGANIA WYTŁOCZKI Z UWZGLĘDNIENIEM NIEJEDNORODNOŚCI WYWOŁANEJ POLEM TEMPERATURY

T A D E U S Z S O Ł K O W S K I (K R A K Ó W)

1. Wstęp

Przeważająca większość rozwiązań procesów obróbki plastycznej metali wykonana jest przy założeniu ciała sztywno-plastycznego jednorodnego. Istnieje jednak grupa procesów obróbki, w których występują znaczne różnice własności metalu w poszczególnych jego obszarach będące wynikiem niejednorodnego pola temperatury. Niejednorodność taka wywoływana jest celowo w procesach tłoczenia blach z miejscowym podgrzewaniem. Nagrzewa się obszar blachy, który doznaje dużych odkształceń, aby obniżyć tam opór płynięcia, natomiast chłodzi się obszar narażony na przenoszenie największego obciążenia, aby zachować w nim wyższą wytrzymałość materiału.

Procesy takie powinny być analizowane z uwzględnieniem niejednorodności materiału.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę procesu wyciągania (pocienia ścianki) wytłoczki z podgrzewaniem jej przez gorący stempel lub sposobem indukcyjnym i intensywnym chłodzeniem od strony dna. Rozwiązania wykonane dla materiału niejednorodnego pozwalają ocenić wpływ wytworzonej różnicy temperatur na przebieg procesu i siłę wyciągania przy różnych kształtach matrycy i stopniach redukcji grubości ścianki.

2. Płaski stan odkształcenia ciała niejednorodnego

Zagadnienia z niejednorodnością ciała plastycznego były przedmiotem wielu prac. Spośród rozwiązań procesów obróbki plastycznej można odnotować wciskanie stempla [1, 5], prasowanie pasma [4], przecinanie pasma [2] i inne. W rozwiązaniach tych stosowano różne podejścia: dążenie do uzyskania rozwiązania zamkniętego [4, 5], podział materiału na skończoną ilość jednorodnych warstw o różnych własnościach [2] oraz rozwiązania numeryczne metodą charakterystyk [1, 5].

Uzyskanie rozwiązań zamkniętych dla bardziej złożonych procesów obróbki plastycznej napotyka duże trudności, dlatego mimo znacznej pracochłonności najbardziej efektywne będą rozwiązania numeryczne. Analizę teoretyczną procesu wyciągania przeprowadza się przy przyjęciu warunków płaskiego stanu odkształcenia, gdyż taki stan jest teoretycznie lepiej opracowany, a z dobrą dokładnością przybliża wyciąganie wytłoczek o dużym stosunku promienia do grubości blachy.

Podstawy metody charakterystyk dla płaskiego stanu odkształcenia ciała plastycznego niejednorodnego podano między innymi w pracach [1, 2, 5]. W przypadku ciała plastycz-

nego niejednorodnego, jego granica plastyczności przy ścinaniu jest funkcją współrzędnych $k = k(x, y)$. Składowe stanu naprężenia wyraża się za pomocą nowych zmiennych σ i φ w następujący sposób:

$$(1) \quad \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_0 + \sigma + k \cos 2\varphi, \\ \sigma_y &= \sigma_0 + \sigma - k \cos 2\varphi, \\ \tau_{xy} &= k \sin 2\varphi, \end{aligned}$$

gdzie $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$, a φ jest kątem jaki tworzy większe z naprężeń głównych z osią x .

Tak wyrażone składowe stanu naprężenia spełniają tożsamościowo warunek plastyczności Hubera–Misesa dla funkcji $k(x, y)$ o dowolnej postaci.

Po wstawieniu do warunków równowagi płaskiego stanu odkształcenia składowych wyrażonych w postaci [1] uzyskuje się układ równań różniczkowych quasi-liniowych typu hiperbolicznego, który posiada dwie rodziny charakterystyk o równaniach:

$$(2) \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right), \quad \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right).$$

Natomiast związki wzdłuż charakterystyk mają postać:

$$(3) \quad \begin{aligned} d\sigma + 2k d\varphi + \frac{\partial k}{\partial x} dy - \frac{\partial k}{\partial y} dx &= 0, \\ d\sigma - 2k d\varphi - \frac{\partial k}{\partial x} dy + \frac{\partial k}{\partial y} dx &= 0. \end{aligned}$$

Dla prędkości, zagadnienie przedstawia się dokładnie tak samo, jak w przypadku ciała jednorodnego: linie α i β są charakterystykami dla prędkości i obowiązują wzdłuż nich związki podane przez GEIRINGER:

$$(4) \quad dv_\alpha + v_\beta d\varphi = 0, \quad dv_\beta - v_\alpha d\varphi = 0.$$

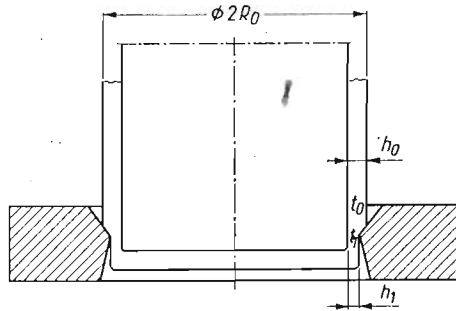
Można więc wyznaczyć pole prędkości za pomocą hodografu, przy czym zachowana jest własność prostokątności między styczną do linii poślizgu i styczną do jej odwzorowania na hodografie.

Warunkiem wystarczającym, aby moc dysypowana nie była ujemna jest według [3], aby kierunek wygięcia linii odwzorowania na hodografie był w każdym punkcie przeciwny niż kierunek wygięcia linii poślizgu.

3. Wyciąganie z podgrzewaniem i miejscowym chłodzeniem

Zasada procesu polega na podgrzewaniu wytłoczki od gorącego stempla lub sposobem indukcyjnym i chłodzeniu jej od strony dna przed rozpoczęciem i w czasie procesu wyciągania (rys. 1). Obszar odkształcenia jest strefą zmiany temperatury. Stopień wytworzonej niejednorodności materiału zależy od temperatury nagrzewania wytłoczki t_0 , czasu i sposobu chłodzenia, a ponadto może zmieniać się w trakcie przebiegu procesu.

Pełna analiza procesu wymagałaby wykonania wielu obliczeń dla różnych stadiów procesu oraz intensywności i czasów chłodzenia. Z punktu widzenia wymiany ciepła, zagadnienie jest również dość złożone. Dlatego, aby wykonanie rozwiązania dla tego typu procesu było możliwe, konieczne jest przyjęcie pewnych założeń upraszczających.



Rys. 1

Przy dużych wartościach promienia wytłoczki R_0 w stosunku do grubości ścianki h_0 , co z reguły ma miejsce, zagadnienie ciepłotne chłodzenia od dołu całego nagrzanego bloku metalu stempel–blacha–matryca można uprościć do przypadku chłodzenia płyty. Rozkład temperatur opisuje wówczas zależność

$$(5) \quad t(x, \theta) = \sum_{n=1}^i A_n \cos\left(\beta_n \frac{x}{g}\right) \exp\left[-\left(\frac{\beta_n}{g}\right)^2 \kappa \theta\right],$$

gdzie x oznacza odległość mierzoną wzdłuż grubości płyty, θ — czas chłodzenia, g — grubość płyty, β_n — pierwiastki równania $\operatorname{ctg} \beta = \frac{1}{\operatorname{Bi}} \beta$, Bi — liczbę Biota, κ — współczynnik wyrównywania temperatur.

Rozkład temperatury w płycie grubej można też przybliżyć parabolą

$$(6) \quad t = t_0 - \Delta t \left(\frac{x}{g}\right)^2,$$

gdzie $\Delta t = t_0 - t_1$, t_0 oznacza temperaturę środka płyty, t_1 — temperaturę powierzchni płyty.

Przy takich założeniach temperatura materiału w strefie odkształcenia zależy wyłącznie od współrzędnej wzdłuż wytłoczki i nie zmienia się po jej grubości. Aby uzyskać funkcję opisującą niejednorodność materiału wytłoczki, należy wyznaczyć granicę plastyczności materiału σ_p w funkcji temperatury.

Przykład funkcji niejednorodności. Dla stali węglowych zależność $\sigma_p(t)$ poniżej temperatury rekryształizacji można przybliżyć wielomianem

$$(7) \quad \sigma_p = At^2 + Bt + C.$$

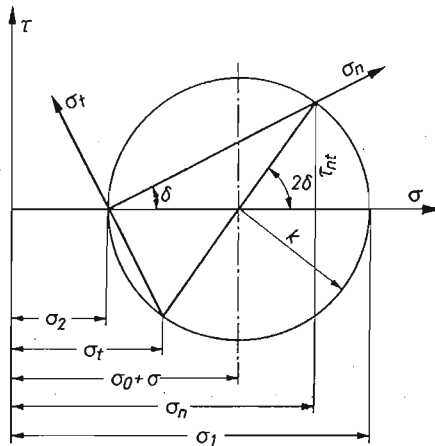
Wytłoczka ze stali 08X jest podgrzewana do temperatury $t_0 = 600^\circ\text{C}$. W procesie wyciągania jej dno i ścianka przeciągnięta są schładzane wodą do temperatury $t_1 = 240^\circ\text{C}$.

Po wstawieniu stałych A, B, C wyznaczonych w próbach jednoosiowego rozciągania w podwyższonych temperaturach oraz przyjmując uproszczony rozkład temperatury (6) uzyskuje się funkcję opisującą niejednorodność materiału wylotczki w postaci

$$(8) \quad \frac{k}{k_0} \left(\frac{x}{x_0} \right) = 1 + 2,64x^2 - 0,864x^4,$$

gdzie k_0 oznacza granicę plastyczności przy ścinaniu materiału w temperaturze t_0 , x_0 — wysokość strefy, wzdłuż której następuje spadek temperatury od t_0 do t_1 .

Rozwiązania procesu przeciągania dla materiału jednorodnego podali HILL, SOŁKOWSKI i in. [6]. Rozwiązanie procesu wyciągania wylotczki rozpoczynamy od sformułowania warunku brzegowego na linii styku materiału z matrycą. Założenie stałego rozkładu nacisku normalnego, jakie czyni się w rozwiązaniu tego procesu dla materiału jednorodnego, byłoby w naszym przypadku błędne.



Rys. 2

Rozpatrzmy bliżej stan naprężenia na powierzchni styku (rys. 2). Składowe stanu naprężenia wynoszą:

$$\sigma_n = \sigma_0 + \sigma + k \cos 2\delta,$$

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma - k \cos 2\delta,$$

$$\tau_{nt} = k \sin 2\delta,$$

gdzie δ jest kątem między kierunkiem normalnym do linii styku a naprężeniem głównym.

Ponieważ nacisk normalny nie jest znany, uwzględnienie tarcia na powierzchni styku jest możliwe tylko przy przyjęciu przybliżonej zależności stosowanej w obróbce plastycznej $\tau_{nt} = \mu k$, gdzie współczynnik μ ma charakter współczynnika tarcia. Można przyjąć, że współczynnik ten wzdłuż linii styku ma wartość stałą. Jednak ponieważ k jest zmienne, więc i siła tarcia jest zmienna.

Kąt między naciskiem normalnym a naprężeniem głównym wynosi $\delta = 0,5 \arcsin \mu$. W ten sposób znany jest kąt φ w każdym punkcie linii styku, gdyż $\varphi = \alpha + \delta$, a α jest kątem nachylenia matrycy.

Zmiana wartości k przy przechodzeniu od punktu do punktu wzdłuż linii styku wyraża się zmianą promienia koła i określonymi zmianami σ_n , σ_t , τ_{nt} , a σ i φ pozostają stałe.

Przy takich założeniach możemy określić szukane wielkości σ i φ na linii styku. Przykładowo w punkcie A (rys. 3) mamy

$$\sigma_{nA} = \sigma + k_A \cos 2\delta,$$

skąd

$$\sigma - \sigma_{nA} = -k_A \cos 2\delta.$$

Wprowadzamy nową wielkość $\bar{\sigma} = \sigma - \sigma_{nA}$, a wówczas $\bar{\sigma} = -k_A \cos 2\delta$. Wartość σ_{nA} będzie tu parametrem, który wyznaczy się na końcu rozwiązania.

Znając wartość $\bar{\sigma}$ i φ wzdłuż linii styku AB możemy rozwiązać zagadnienie brzegowe Cauchy'ego ABC stosując związki (2) i (3). Rozwiązanie wykonano metodą różnic skończonych. Najpierw bierze się wartości φ_1 i φ_2 w dwóch punktach wyjściowych i ze związków (2) oblicza się pierwsze przybliżenie współrzędnych x_M, y_M szukanego punktu M . Następnie ze związków (3) wyznacza się φ_M i $\bar{\sigma}_M$, po czym można przystąpić do obliczania drugiego i dalszych przybliżeń. Rozwiązanie przedstawione na rys. 3a wykonano dla $\alpha = 30^\circ$, $\mu = 0,31$, $h_1/h_0 = 0,76$ i funkcji niejednorodności materiału, jak w przykładzie.

Punkty A i B są punktami osobliwymi. Zakładamy w nich skoki wartości φ i obliczamy odpowiadające im wartości $\bar{\sigma}$ z zależności (3) wzdłuż charakterystyki α w punkcie A i β , w punkcie B dla $dx = 0$ i $dy = 0$.

Położenie punktu F wyznacza się z warunku, aby charakterystyki przecinały drugi brzeg blachy pod kątem $\pi/4$, gdyż tarcie na tym brzegu nie występuje.

Wyznaczona siatka linii poślizgu przesunięta jest w kierunku obszaru materiału o wyższej temperaturze.

Parametr σ_{nA} wyznacza się numerycznie z warunku, aby wypadkowa naprężeń na wejściu była równa zeru, gdyż ciągnięcie jest bez przeciwciągu. Znając wartość σ_{nA} możemy określić rozkład σ_n na linii styku.

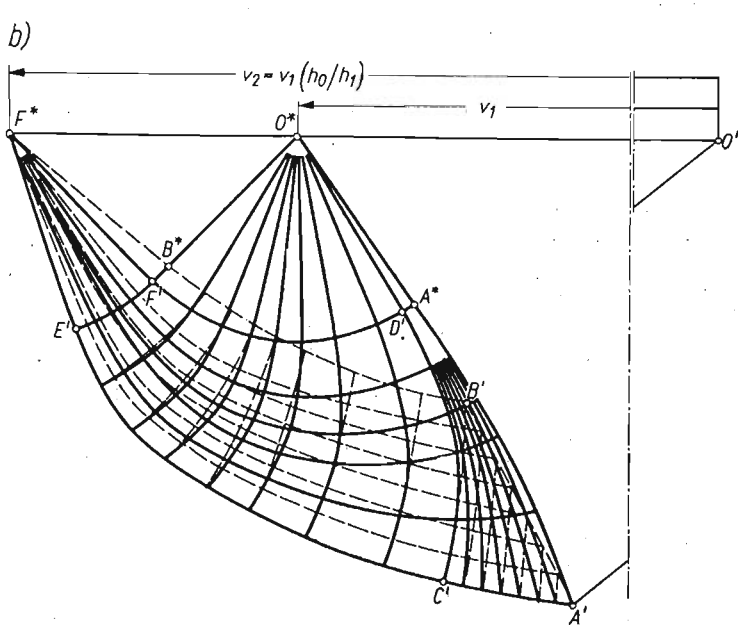
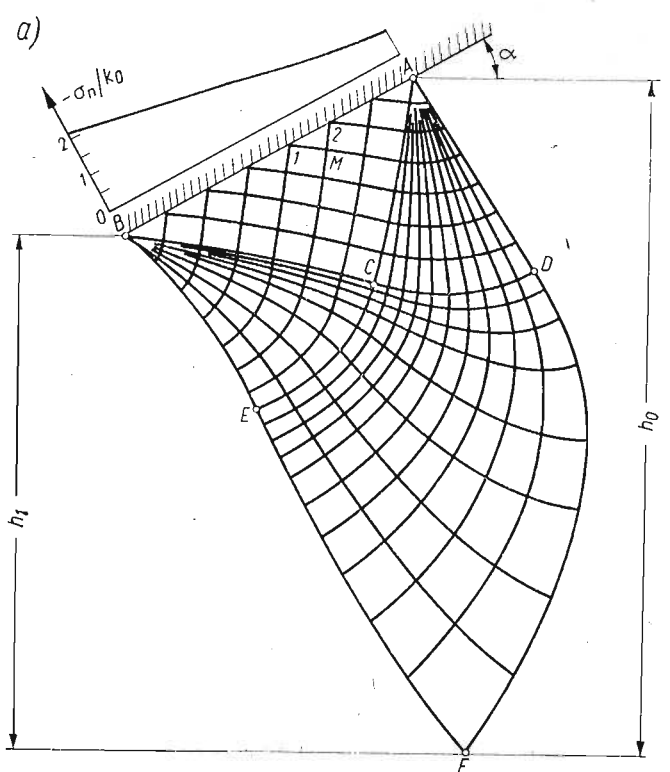
Wypadkowa naprężeń na wyjściu, po uwzględnieniu parametru σ_{nA} daje wartość naprężenia ciągnącego σ_c . Wartość naprężenia ciągnącego można również znaleźć obliczając sumę rzutów na oś x wszystkich sił działających na linii styku. Obie drogi obliczeń dają w wyniku tę samą wartość σ_c . Z przedstawionego rozwiązania można również znaleźć rozkład nacisku σ_n i naprężenie ciągnące σ_c dla innych stopni redukcji grubości blachy, gdyż założono, że wzdłuż grubości ścianki niejednorodność nie występuje.

Plan prędkości (rys. 3b) buduje się podobnie jak w przypadku materiału jednorodnego. Materiał na wejściu ma prędkość v_1 , a na wyjściu $v_2 = v_1 \cdot h_0/h_1$.

Linia $A'B'$ jest odwzorowaniem linii styku AB . Na odwzorowaniu tym wypadkowe wektorów prędkości są skierowane równoległe do linii styku.

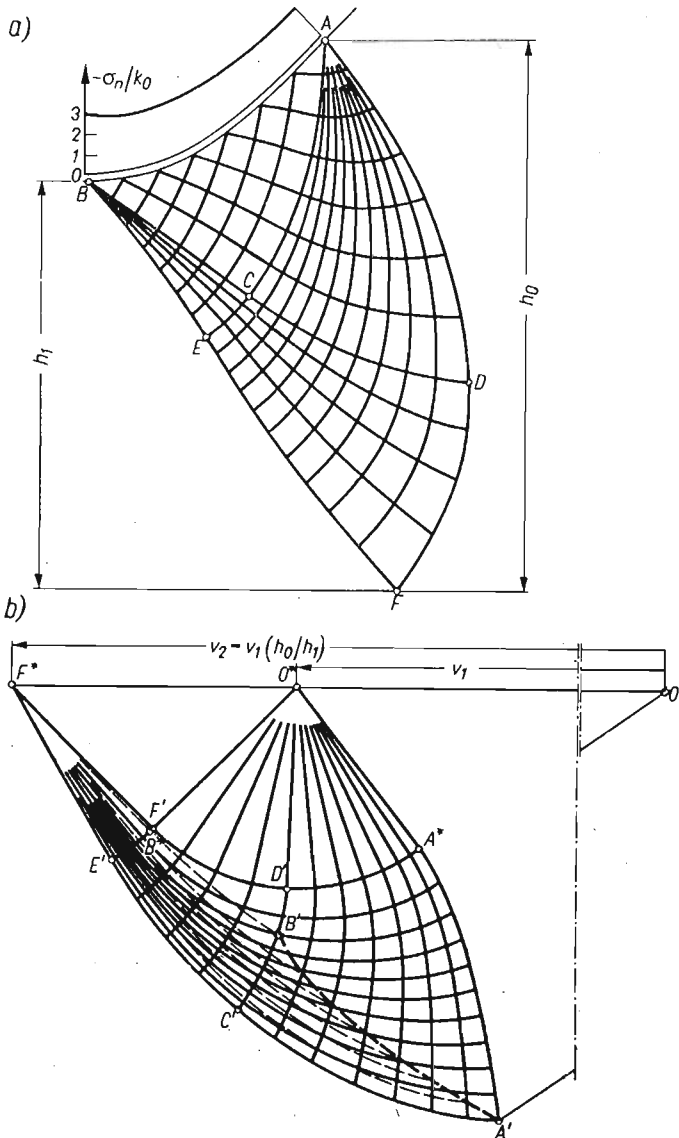
Hodograf na rys. 3b wyznaczono numerycznie, biorąc do obliczeń wartości kątów w węzłach siatki linii poślizgu. Przy wyznaczaniu tylko pierwszego przybliżenia siatki linii poślizgu, niedokładność na hodografie wartości v_1/v_2 w stosunku do wartości h_1/h_0 wynosi około 5%.

Z obserwacji hodografu i siatki linii poślizgu wynika, że krzywizny linii poślizgu i ich odwzorowań na hodografie są przeciwnie ukierunkowane, a więc warunek dodatniości mocy dysypowanej będzie spełniony. Uzyskane rozwiązanie jest kinematycznie dopuszczalne i stanowi ocenę górną wartości naprężenia ciągnącego.



Rys. 3

Przy założeniach przyjętych na początku analizy procesu, można również wykonać rozwiązanie procesu wyciągania dla matrycy o profilu krzywoliniowym, gdyż w każdym punkcie znany jest kąt α , a kąt δ jest stały i zależy od przyjętej wartości μ . Rozwiązanie



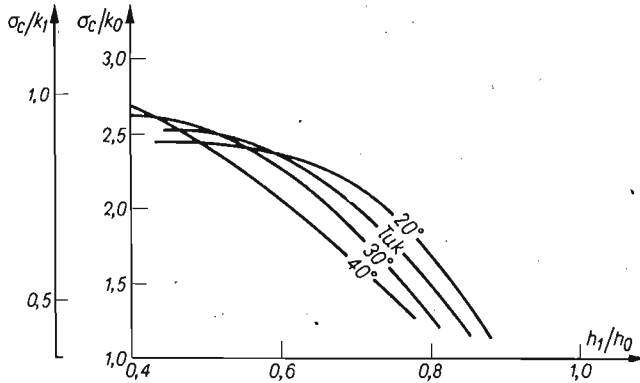
Rys. 4

dla matrycy o specjalnie zaprofilowanym łuku przedstawiono na rys. 4 przy $\mu = 0,31$, $h_1/h_0 = 0,75$ oraz funkcji niejednorodności, jak w przykładzie.

Na rys. 5 przedstawiono zależność naprężenia ciągnącego σ_c od stopnia pocienienia ścianki wytłoczki (stosunku h_1/h_0) dla różnych analizowanych kształtów matrycy. W za-

kresie stopni redukcji grubości nie objętych krzywymi mogą zająć inne schematy odkształcenia.

Teoretycznie, przeciągnięta ścianka wytłoczki może przenieść naprężenie ciągnące $2k_1$. Z obliczeń wynika więc, że dzięki wywołaniu niejednorodności temperaturowej można uzyskać duże, bardzo korzystne dla praktyki stopnie odkształcenia sięgające do $h_1/h_0 = 0,4$, co w zwykłym procesie wyciągania nie jest możliwe.



Rys. 5

4. Uwagi końcowe

Przedstawiony przykład wykazuje, że na podstawie teorii płaskiego płynięcia ciała niejednorodnego można analizować procesy obróbki plastycznej z niejednorodnością metalu wywołaną polem temperatury. Wpływ tej niejednorodności ma istotne znaczenie w procesach tłoczenia z miejscowym podgrzewaniem i chłodzeniem. Mimo dość dużej pracochłonności obliczeń, przyjęta procedura teoretycznej analizy procesu, przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej, może być z powodzeniem stosowana. Oprócz wyznaczenia naprężenia ciągnącego i nacisku normalnego, można jeszcze uzyskać ważne informacje o sposobie zalegania obszarów uplastycznionych i sztywnych. Potwierdzenie i uściślenie uzyskuje przewidywany intuicyjnie fakt, że strefa uplastyczniona przesuwa się w kierunku obszaru materiału o wyższej temperaturze, natomiast strefa chłodzona pozostaje w stanie sztywnym.

Wywołanie temperaturowej niejednorodności materiału daje możliwość uzyskania znacznych stopni odkształcenia, które normalnie nie mogłyby być zrealizowane.

Literatura cytowana w tekście

1. D. BERTHET, J. C. HAYOT, J. SALENÇON, *Poinçonnement d'un milieu semi-infini en matériau plastique de Tresca non-homogène*, Archiv. Mechanics (Archiw. Mech. Stos.), 24 (1972), 127 - 138.
2. М. Я. БРОВМАН, В. Л. МИТРИУХИН, *Усилия при осадке неравномерно нагретых заготовок*, Кузн.-штамп. Проз., 10 (1968), 3 - 5.
3. D. J. F. EWING, R. HILL, *The plastic constraint of V-notched tension bars*, J. Mech. Phys. Sol., 15 (1967), 115 - 124.

4. А. А. Ильюшин, *Некоторые вопросы теории пластического течения*, Изв. АН СССР, ОТН, 2 (1958), 64 - 86.
5. W. KOWALCZYK, *The indentation problem of a semi-infinite transversally non-homogeneous body acted on by a rigid punch*, Bull. Acad. Polon. Sci., Série Sci. Techn., 13 (1965), 193 - 200.
6. W. SZCZEPIŃSKI, *Wstęp do analizy procesów obróbki plastycznej*, PWN, Warszawa 1967, Rozdział VI, Procesy stacjonarne w płaskim stanie odkształcenia.

Резюме

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ С УЧЕТОМ
НЕОДНОРОДНОСТИ ВЫЗВАННОЙ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ

В работе представлены примеры решения задачи о вытяжке стенки штампованной заготовки с подогревом и местным охлаждением. Использован метод характеристик для плоского течения пластически неоднородного тела. Получены сетки линий скольжения и годографы для прямолинейных и криволинейных матриц. Для заданного перепада температуры материала рассчитано напряжение вытяжки при разных формах матриц и разной степени деформации.

Summary

ANALYSIS OF IRONING OF A CUP WITH NON-HOMOGENEITY
PRODUCED BY A TEMPERATURE FIELD

The method of characteristics is applied to the problem of twodimensional plastic flow of a non-homogeneous plastic body to present the solutions of the cup ironing process with heating and local cooling. The slip-lines networks and hodographys are obtained for dies of rectilinear and curvilinear profiles. The stresses are determined, at a constant temperature differences in the material, at various strain stages and die profiles.

POLITECHNIKA KRAKOWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 7 stycznia 1977 r.