

MODELOWANIE NAPRĘŻEN KONTAKTOWYCH W PROCESACH WYCISKANIA

JAN PIWNİK (BIAŁYSTOK)

W publikacji opracowano nowe zastosowania metody czujników otworowych do pomiaru naprężeń kontaktowych w procesach współbieżnego i przeciwbieżnego wyciskania. Pokazano nowe przykłady pomiaru składowych normalnych naprężeń na powierzchniach styku deformowanej plasteliny ze ściankami pojemników, matryc i stempli wykonanych z przezroczystego pleksi. Plasteliny użyto jako materiału modelowego. W bocznych ściankach pojemników oraz w stemplach wywiercono szereg małych otworów lub rowków. W trakcie wyciskania materiał zostaje poddany odkształceniu w wyniku redukcji przekrojów początkowych. Jednocześnie do bocznych otworków lub rowków w pojemnikach i stemplach wnika deformowany materiał. Lokalna wysokość zapełnienia rowków jest uważana za proporcjonalną do lokalnego naprężenia normalnego. Cechowanie tej zależności odbywało się przez pomiar siły na stemplu i odpowiadającej jej średniej wysokości napełnienia rowków w stemplu. Badania wykonano dla trzech stopni redukcji wyciskania współbieżnego i czterech stopni redukcji wyciskania przeciwbieżnego. Metoda wykazała dużą wrażliwość przebiegów rozkładów naprężeń normalnych na linii konturu matrycy i na powierzchniach stempli w zależności od stopnia redukcji początkowych wymiarów wyciskania próbek. Przedstawione rezultaty mają charakter jakościowy i mogą być przydatne na wstępnym etapie projektowania procesów wyciskania. Dotyczy to głównie wyznaczania ilościowej wielokrotności lokalnych naprężeń normalnych wzdłuż powierzchni styku materiału z matrycami w stosunku do średnich naprężeń normalnych na stemplu. Metoda cechuje się prostotą i niskim kosztem badań.

1. WPROWADZENIE

Znajomość naprężeń działających na powierzchni kontaktu deformowanego plastycznie materiału z narzędziem jest punktem wyjścia do technicznej analizy procesów obróbki plastycznej. Rozwiązanie tego problemu na drodze teoretycznej metodami teorii plastycznego płynięcia jest bardzo kłopotliwe. Napotyka ono trudności podstawowe z powodu braku warunków brzegowych i silnej nieliniowości podstawowego układu równań stanu plastycznego. Sprawy te omówiono szczegółowo w pracach [1, 2, 3 i 4].

Dlatego też wyznaczanie naprężeń kontaktowych w złożonych procesach obróbki plastycznej odbywa się najbardziej efektywnie metodami mechaniki eksperymentalnej.

Dotychczas najczęściej wyznaczano składowe normalne i styczne naprężeń

kontaktowych w procesach obróbki plastycznej następującymi doświadczalnymi metodami: a) metodą czujników trzpieniowych [4, 5, 6, 7, 8 i 9], b) metodą wkładek elasto-optycznych [4, 10, 11, 12, 13 i 14], c) metodą odcisków na folii [4, 15 i 16] oraz d) metodą czujników otworowych [6 i 17].

Rozpowszechnioną metodą stosowaną do pomiaru, głównie składowych normalnych, naprężeń kontaktowych jest metoda czujników trzpieniowych. Do szeregu małych otworów w matrycy lub innego narzędzia wkłada się elementy pomiarowe w formie małych trzpieni. Reagują one na składowe normalne prędkości przemieszczenia znajdującego się materiału na powierzchni styku. Są to na przykład czujniki węglowe [6]. Ten sposób pomiaru naprężeń kontaktowych ma tę zaletę, że wykorzystuje się go w badaniach rzeczywistych procesów plastycznego kształtowania metali. Wady i zalety metody czujników trzpieniowych wielokrotnie dyskutowano w szeregu monografii [4, 6, 15 i 16]. Metoda czujników trzpieniowych jest nadal doskonała pod kątem przystosowania jej do dokładniejszego pomiaru składowych stycznych naprężeń kontaktowych, które utożsamia się z naprężeniami od sił tarcia [4].

Największą wartość naukową i dokładność pomiaru naprężeń kontaktowych umożliwiają metody polaryzacyjno-optyczne [10 i 11]. Jednak ograniczają się one przede wszystkim do modeli, a nie rzeczywistych procesów, co stanowi ich podstawową wadę. Metoda ta znajduje ostatnio wielu zwolenników i służy głównie do weryfikacji doświadczalnej rozwiązań teorii plastyczności. Stan badań w tym zakresie omówiono w monografiach [10, 12, 13 i 14].

Metoda odcisków na folii polega na przykrywaniu pomiarowych otworów w narzędziu specjalną cienką folią na której, przy deformacji materiału, tworzą się odciski. Wymiary ich są w przybliżeniu proporcjonalne do składowych normalnych naprężeń działającego na powierzchnię narzędzia [4, 15 i 16]. Folia jest uprzednio wycechowana, co pozwala z wymiarów odcisków wykonać wykres naprężeń normalnych działających na powierzchni styku. Metoda ta jest stosunkowo łatwa w stosowaniu, ale mało dokładna i może być pomocna przy wstępnej, jakościowej analizie naprężeń kontaktowych.

Również do pośrednich sposobów wyznaczania składowych normalnych naprężeń na powierzchni kontaktu zdeformowanego materiału z narzędziem należy metoda czujników otworowych. Koncepcja ta jest oparta na zasadzie pracy czujnika trzpieniowego. Tylko w czujniku tym brak jest elementu trzpieniowego. Zostaje zatem sam pusty otwór lub rowek. Lokalną wartość składowej normalnej naprężenia oblicza się z wykresów cechujących i wysokości napływu zdeformowanego materiału do pustych otworów lub rowków znajdujących się w narzędziu.

Pomysł wyznaczania składowych normalnych naprężeń kontaktowych z wysokości zapełnienia zdeformowanym materiałem uprzednio pustych otworów lub rowków w narzędziu był stosowany tylko w prostych procesach ściskania cylindrycznego próbek z ołowiem [6].

Chociaż metoda czujników otworowych służy głównie do jakościowej analizy rozpatrywanego problemu, to jednak ze względu na prostotę pomiaru i praktyczne znaczenie warto jest rozszerzyć ten sposób badań naprężeń kontaktowych na procesy wyciskania współbieżnego i przeciwbieżnego.

Celem pracy jest zastosowanie metody czujników otworowych do analizy naprężeń kontaktowych na powierzchni styku materiału z matrycami i stemplami w osiowo-symetrycznych procesach wciskania współbieżnego i przeciwbieżnego. Wyciskano próbki wykonane z plasteliny. Plastelinę wykorzystano w charakterze materiału modelowego, zastępującego zachowanie się rozgrzanego stopu metalu.

2. METODYKA BADAŃ

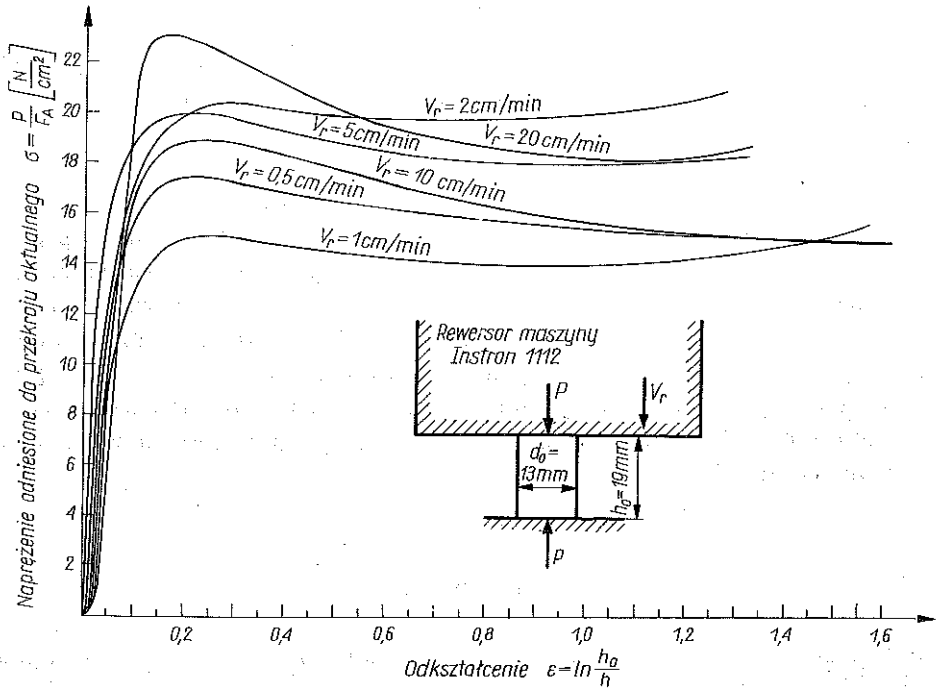
Przedstawione dalej wyniki badań doświadczalnych, odnośnie rozkładu naprężeń normalnych na ściankach pojemników, matryc i stempli, uzyskano na próbkach wykonanych z plasteliny wymieszanej z olejem rzepakowym w proporcjach pięć części objętości plasteliny handlowej na jedną część oleju.

Przebieg krzywej materiałowej naprężenie-odkształcenie $\sigma = \sigma(\epsilon)$ uzyskanej przy ściskaniu cylindrycznych próbek ze stosowanej dalej plasteliny pokazano na rys. 1. Na rys. 1 podano wymiary próbki i prędkości ruchu tawersy maszyny INSTRON 1112 przy ściskaniu. Naprężenia odnoszono do przekroju aktualnego, odkształcenie określono miarą logarymiczną. Wielkości h_0 i h oznaczają wysokości początkową i aktualną ściskanej próbki, natomiast jej przekrój aktualny F_A obliczono z założenia o stałej objętości próbki.

Powierzchnie czołowe cylindrycznych próbek były smarowane olejem rzepakowym. Beczkowatość towarzysząca próbkom ściskania była znikoma.

Z wykresów $\sigma = \sigma(\epsilon)$ na rys. 1 wynika, że kształt tych krzywych jest podobny do analogicznych krzywych otrzymanych dla stopów metali odkształczanych w wysokich temperaturach [4]. Widoczna na rys. 1 wrażliwość przebiegu krzywych materiałowych $\sigma = \sigma(\epsilon)$ na prędkość odkształcenia jest przypadkowa i należy ją przypisać rozrzutowi wynikającemu z odchyłek gęstości materiału powstałych w trakcie przygotowania próbek.

Uważamy dalej, że krzywą $\sigma = \sigma(\epsilon)$ można z dobrym przybliżeniem aproksymować modelem sztywno-plastycznym. Stąd też pokazane dalej wyniki można odnieść do takich rzeczywistych materiałów, których zachowanie się w złożonych stanach naprężeń można opisać wspomnianym modelem.



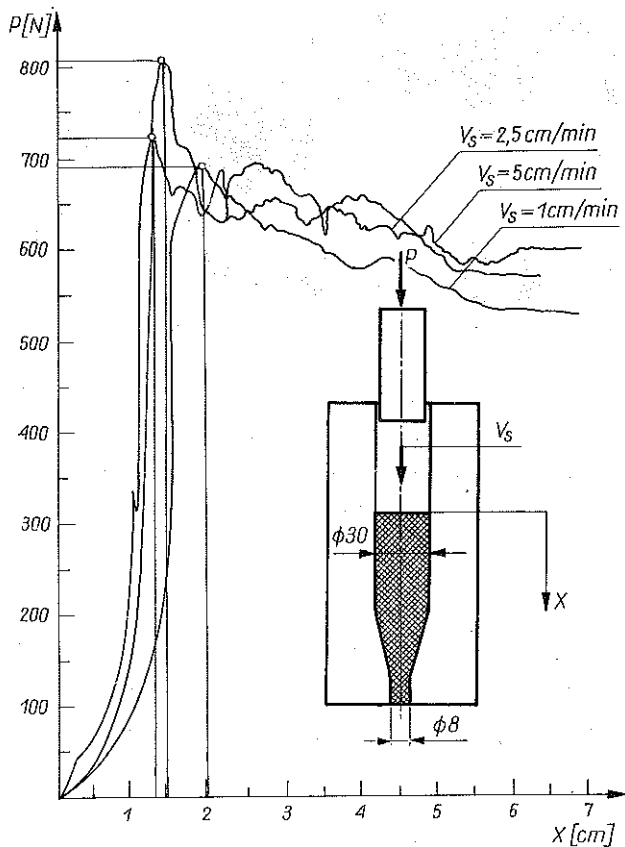
Rys. 1

Próbki w kształcie cylindrów o stosunku wysokości do średnicy około trzech wyciskano współbieżnie i przeciwbieżnie w specjalnych pojemnikach wykonanych z przezroczystego pleksi.

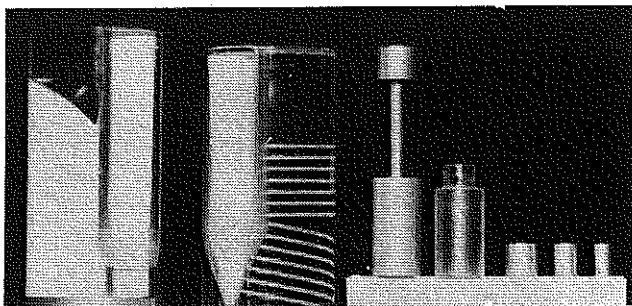
Przykład wykresu siły P jako funkcji przemieszczenia stempla X w pełnym pojemniku obrazuje rys. 2. Próbki o średnicy 30 mm były redukowane do średnicy 8 mm z trzema prędkościami stempla: 1 cm/min, 2,5 cm/min i 5 cm/min. Wykres siły jako funkcji przemieszczenia stempla otrzymano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1112, której użyto jako prasy. Z wyników na rys. 2 widzimy, że siła na stemple w ustalonej fazie procesu jest mało wrażliwa na prędkość stempla.

Na rys. 3 i 4 pokazano fotografię stanowisk do wyciskania współbieżnego. Widzimy na nich, że w bocznych ściankach pojemników nawiercono szereg otworków prostopadle do linii konturu centralnego otworu w części cylindrycznej i stożkowej. Również w stemplach nawiercano otworki prostopadle do ich czołowych powierzchni.

W drugiej wersji zamiast szeregu otworków wyfrezowano na wskroś, równoległe do przekroju wzdłużnego pojemnika, pusty rowek. Również w stemplach wyfrezowano pusty rowek prostopadle do ich powierzchni czołowych.

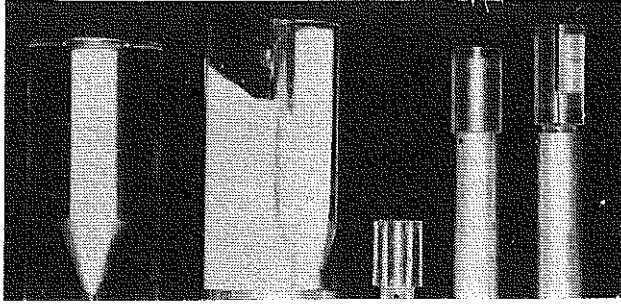


Rys. 2



Rys. 3

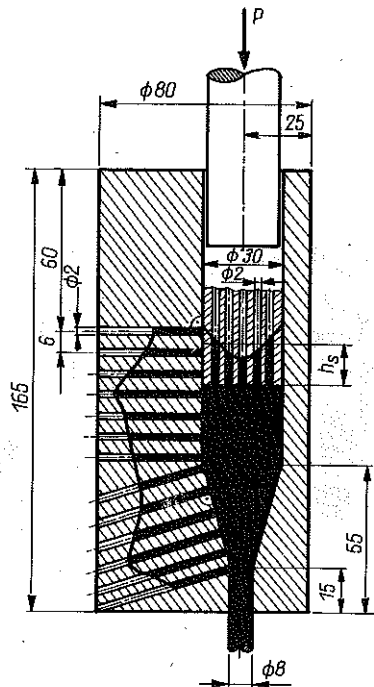
Rysunki 3, 4 przedstawiają trzy stanowiska z dwoma wariantami pomiarowymi i trzema stopniami redukcji. Widoczne są na nich również komplety stempli, do których trzpienie wykonano ze stopu aluminium PA2. Pojemniki wykonano z przezroczystego pleksi.



Rys. 4

Zasadę pomiaru składowej normalnej do linii konturu centralnego otworu oraz pracę przyrządu ilustruje rys. 5. Podano na nim wymiary pojemnika i otworków. Podczas wyciskania materiał (który zaznaczono czarnym kolorem) zostaje poddany odkształceniu, w wyniku którego średnica początkowa próbki $\phi = 30$ mm zostaje zredukowana na wyjściu do $\phi = 8$ mm.

Jednocześnie do bocznych otworków w pojemniku oraz w stemplu napływa deformowany materiał. Wysokości zapelnienia rowków na rys. 5 odpowiadają zaawansowanej, ustalonej fazie wyciskania, przy której siła na stemplu stabilizuje się. Rysunek 5 zawiera rzeczywiste wyniki odnośnie



Rys. 5

długości odcinków reprezentatywnych wysokości czarnych słupków w otworkach.

Przeciętna wysokość czarnego słupka na stemple h_s odpowiada sile P . Dzieląc siłę P przez pole powierzchni czołowej stempla F_s otrzymujemy naprężenie P_{ns} średnie. Odpowiada ono średniej wysokości czarnego słupka na stemple h_s .

Przyjmujemy następnie założenie, że wysokość czarnego słupka w dowolnym rowku jest proporcjonalna do lokalnej wartości składowej naprężenia normalnego σ_n . Wartość naprężenia σ_n mierzymy wielokrotnością średniego naprężenia P_{ns} odpowiadającego średniej wysokości słupka h_s na stemple.

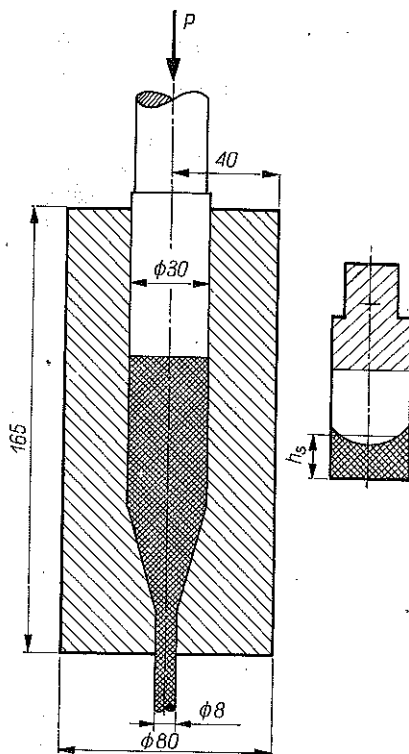
Zatem lokalne naprężenie normalne w dowolnym otworze wynosi

$$(2.1) \quad \sigma_n = P_{ns} \cdot \frac{h}{h_s},$$

gdzie

$$P_{ns} = \frac{P}{F_s},$$

oznacza średnie naprężenie normalne na stemple oraz h lokalną wysokość wnikniętego materiału (wysokość czarnego słupka).

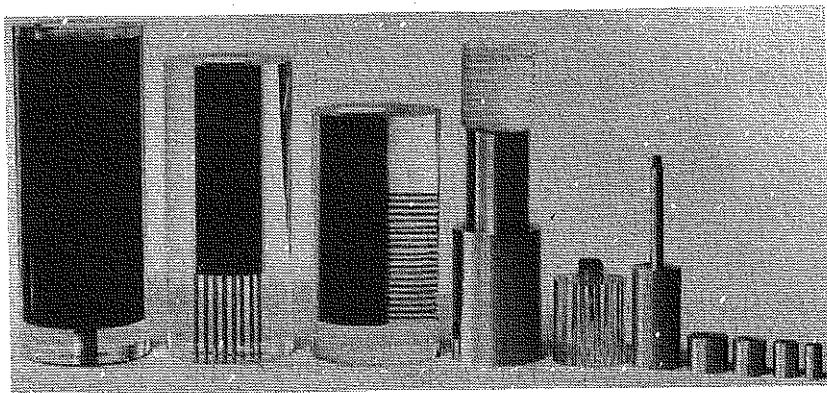


Rys. 6

Zamiast układu otworków można wykorzystać puste rowki nacięte w pojemniku i stemplu. Rysunek 6 przedstawia stanowisko, w którym wyfrezowano rowek tylko wzdłuż głównej płaszczyzny stempla. Zaznaczona na rys. 6 średnia wartość wysokości wciśniętego materiału h_s odpowiada średniemu naprężeniu normalnemu P_{ns} . Następnie mierząc wysokość wciśniętego materiału h na kierunku prostopadłym do linii rowka, można ze wzoru (2.1) obliczyć lokalne naprężenie normalne σ_n . Pozwala to na wyznaczenie ciągłego wykresu naprężeń normalnych, którego kształt pokrywa się z kształtem górnej powierzchni wciśniętej do rowka warstwy materiału. Dodajmy, że rys. 6 odpowiada rzeczywistej sytuacji przy omawianej redukcji.

Na rys. 5 i 6 obserwujemy silnie niejednorodny rozkład naprężeń normalnych na stemplu, jak też na powierzchniach cylindrycznej i stożkowej części pojemnika.

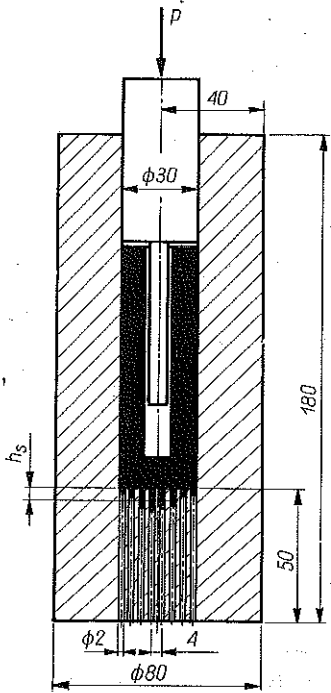
Analogiczną metodę zastosowano do wyznaczania rozkładów naprężeń normalnych w procesach wyciskania przeciwbieżnego.



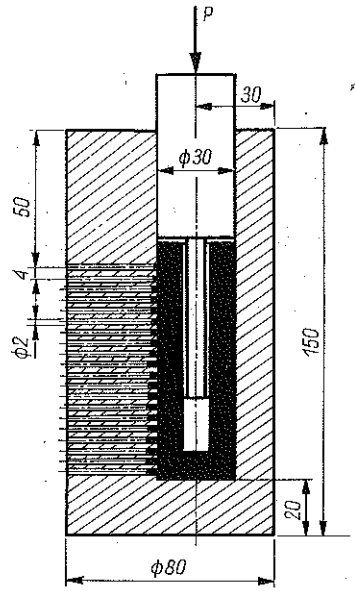
Rys. 7

Stanowisko do badań pokazano na rys. 7. Wyznaczono rozkłady naprężeń normalnych wzdłuż tworzącej centralnego otworu i na jego dolnej powierzchni czołowej. Dodatkowo można obserwować zmiany wysokości czarnych słupków materiału wnikaącego do otworków wywierconych w powierzchniach przekroju stempla (por. rys. 7). Zasadę pracy i wymiary stanowiska do wyciskania przeciwbieżnego obrazują kolejno rys. 8, 9m i 10. Stanowisko wykonano również z przezroczystego pleksi.

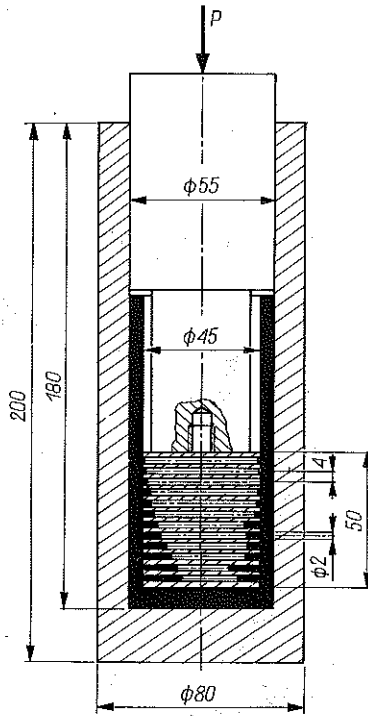
Lokalną wartość naprężeń normalnych wyznaczano jak przy wyciskaniu współbieżnym. Wyjściową wysokość cechującej h_s brano jako średnią wysokość czarnych słupków pod stemplem w stanowisku pokazowym na rys. 8. Wysokości czarnych słupków na rys. 8, 9 i 10 odpowiadają rzeczywistej sytuacji.



Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10

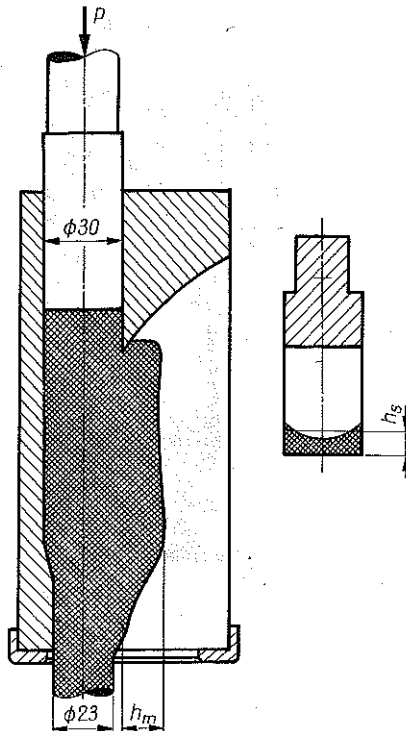
Obydwie grupy przyrządów dopuszczają możliwość stosowania różnych redukcji przekrojów początkowych wyciskanych cylindrycznych próbek z plasteliny.

We wszystkich przypadkach wyciskanie prowadzono z prędkością ruchu postępowego stempla $V_s = 1$ cm/min. Proces przerywano, kiedy na odcinku przemieszczenia stempla nie krótszym od średnicy próbki następowała stabilizacja wartości siły. Okazało się, że zakłócenie wywołane obecnością rowków i otworków w pojemnikach i na stemplach nie wpłynęły istotnie na proces ustalania się siły wyciskania.

3. WYNIKI BADAŃ

Wykorzystując przedstawione wyżej stanowiska badawcze przeprowadzono doświadczenia z wyciskaniem współbieżnym i przeciwbieżnym.

Na rys. 11 pokazano czarnym kolorem zarys konturu plasteliny wciśniętej do pustych rowków w pojemniku i stemple. Największą wysokość wnikiętej warstwy h_m obserwujemy w rejonie naroża stożka matrycy. Przy otworze



Rys. 11

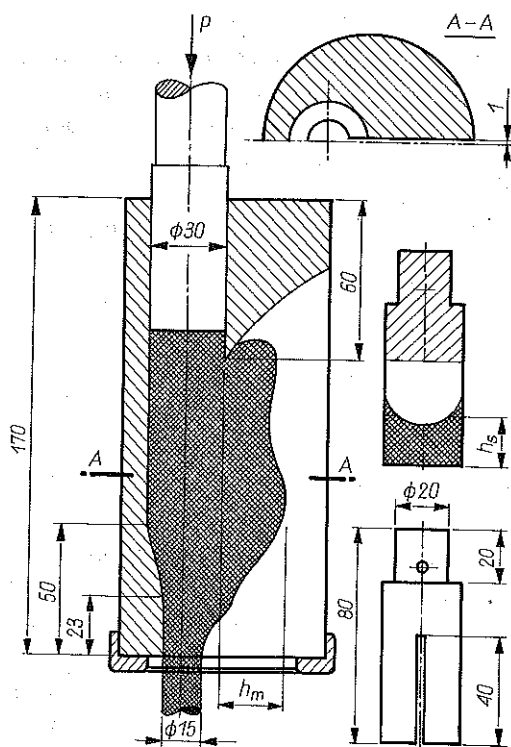
wyjściowym $\phi = 23$ mm obserwujemy stopniowe zmniejszenie się naprężeń kontaktowych.

Rozkład naprężeń normalnych na stemplach jest niejednorodny. Najmniejszą wartość ma naprężenie normalne w miejscu najmniejszego oporu, jaki stawia matryca, to jest naprzeciw otworu. Największe naprężenie normalne występują w skrajnych polach powierzchni stempla. Na rys. 11 widzimy, że naprężenie normalne w obszarze przyległym do naroża stożka, określane wielkością h_m , jest około trzykrotnie większe od średniego nacisku normalnego na stemplu reprezentowanego przez odcinek h_s .

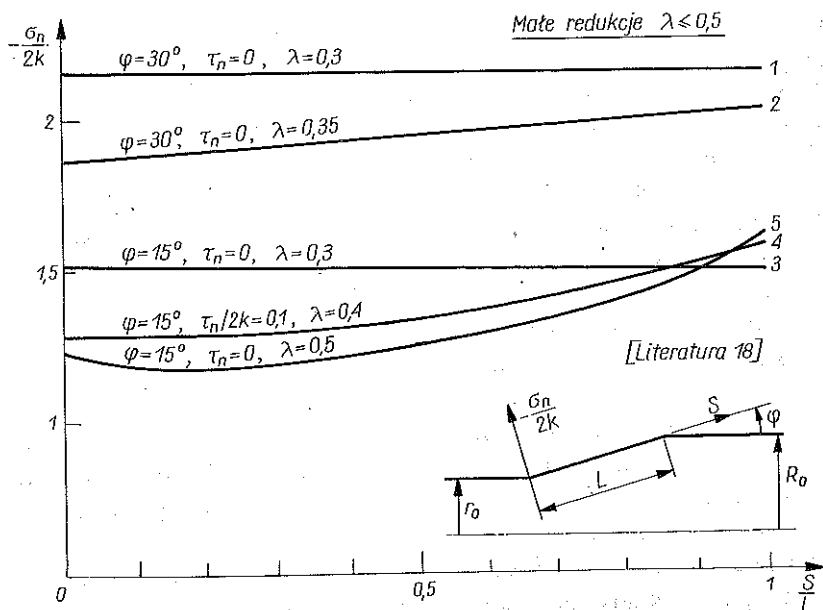
Rysunek 12 obrazuje również rozkład normalnych naprężeń kontaktowych w procesie wyciskania współbieżnego. Średnicę początkową próbki $\phi = 30$ zredukowano do $\phi = 15$ mm.

W porównaniu do poprzedniego rysunku widzimy istotny wzrost wysokości h_m , tj. naprężenia normalnego na przejściu cylindrycznej części pojemnika w stożkową. Obserwujemy przy tym dodatkowo bardziej nierównomierny rozkład nacisków normalnych na stemplu.

Pokazane kształty wciśniętej części materiału w puste rowki, pośrednio reprezentujące rozkłady normalne naprężeń kontaktowych, są jakościowo zgodne z kształtem analogicznych wielkości otrzymanych przy przybliżonej,



Rys. 12



Rys. 13

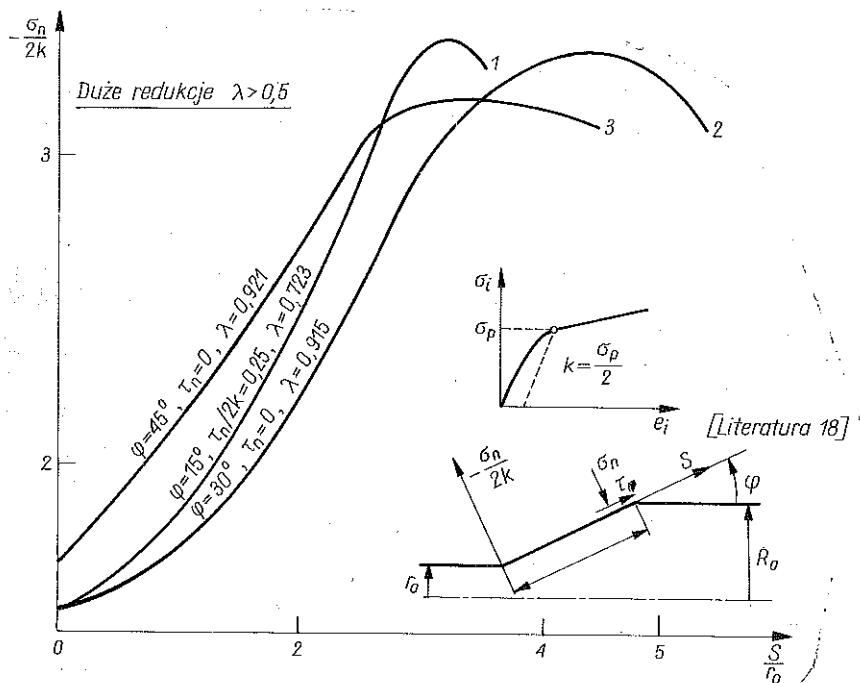
teoretycznej analizie osiowo-symetrycznego wyciskania metodą charakterystyk, otrzymanego w pracy [18]. Rozwiązanie przedstawiono dla modelu sztywno-plastycznego bez wzmocnienia i warunku plastyczności Treski, przy przyjęciu postulatu pełnej plastyczności Haara-Kármána. Metoda rozwiązania rozważanego przypadku polega na wykorzystaniu warunków brzegowych wyrażonych w prędkościach do sformułowania warunków brzegowych w naprężeniach na linii konturu matrycy lub wyznaczeniu równania charakterystyki ograniczającej obszar uplastycznienia.

W tym celu przy małych redukcjach średnicy początkowej materiału $\lambda \leq 0,5$ zakłada się wstępnie pewną funkcję rozkładu nacisku σ_n wzdłuż linii styku materiału z matrycą. Stopień redukcji wyraża się wzorem

$$\lambda = 1 - \left(\frac{R_0}{r_0} \right)^{-2},$$

gdzie R_0 i r_0 oznaczają odpowiednio połowę średnicy na wejściu i po redukcji. Następnie postać funkcji nacisku σ_n wyznaczamy iteracyjnie z warunkiem spełnienia ciągłości składowej normalnej prędkości do powierzchni styku materiału z matrycą.

Przy znacznych redukcjach $\lambda > 0,5$ z warunków brzegowych wyrażonych w prędkościach dobieramy wstępnie równanie krzywej określającej brzeg obszaru sztywno-plastycznego, po czym iteracyjnie tak korygujemy jej kształt, aby spełniony był warunek ciągłości składowej normalnej prędkości do linii



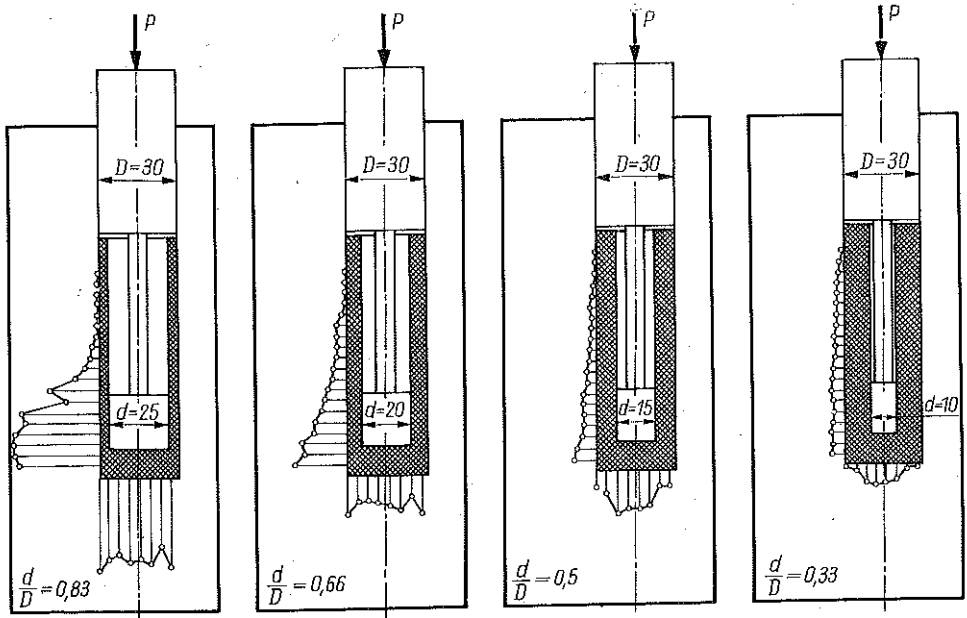
Rys. 14

konturu matrycy. W obydwu przypadkach na liniach ograniczających obszar uplastycznienia usuwano nieciągłości prędkości. Dalszy ciąg postępowania przy wyznaczaniu pól naprężeń i prędkości odbywa się według algorytmu stosowanego w zadaniach statycznie wyznaczalnych [1]. Rozkłady bezwymiarowych teoretycznych naprężeń normalnych $-\sigma_n/2k$ dla małych i dużych redukcji zaczerpnięto z pracy [18] i pokazano je na rys. 13 i 14. Wielkością k oznaczono granicę plastyczności na ścinaniu, która dla warunku plastyczności Treski jest równa połowie wartości granicy plastyczności otrzymanej w próbie jednoosiowego rozciągania próbki cylindrycznej.

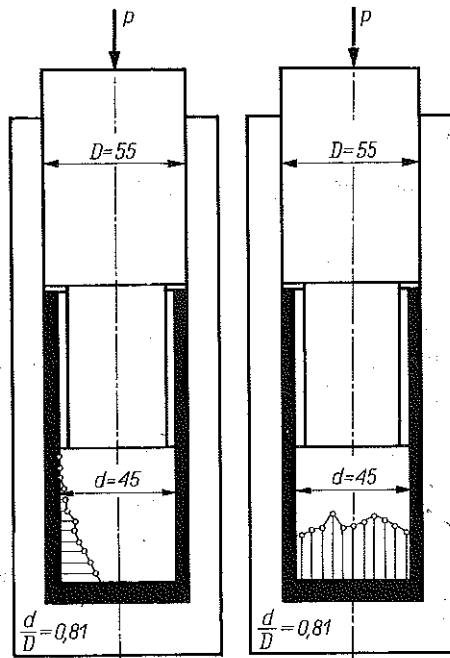
Wykresy na rys. 13 i 14 przedstawiają przebiegi bezwymiarowych naprężeń normalnych przy różnych kątach stożka matrycy φ i współczynniku tarcia $\tau_n/2k$, gdzie τ_n jest naprężeniem stycznym na powierzchni kontaktu materiału z matrycą.

Porównując wykresy naprężeń normalnych, szczególnie na rys. 14, z analogicznymi wielkościami uzyskanymi w omawianych doświadczeniach, których wyniki zestawiono na rys. 5, 11 i 12 widzimy dobrą jakościową zgodność obydwu grup rezultatów.

Na rys. 15 pokazano zbiorcze zestawienie rozkładów naprężeń normalnych na ściankach pojemników i stemplach w procesach przeciwnego wyciskania próbek cylindrycznych. Realizowano cztery stopnie redukcji.



Rys. 15



Rys. 16

Odcinki prostopadłe do odpowiednich powierzchni na bocznych i dolnych wykresach obok wyciśniętych tulejek (czarny kolor) odpowiadają lokalnym wartościom naprężeń normalnych. Widzimy tu jednoznaczny związek nacisków normalnych na powierzchni narzędzi od stopnia odkształcenia wyciskanego materiału. Największe niejednorodności i wartości naprężeń normalnych lokalizują się w dolnych narożach otworu centralnego pojemnika. Wzrost stosunku średnic d/D od 0,33 do 0,83 wywołuje co najmniej sześciokrotny wzrost naprężeń normalnych w narożach dolnej, czołowej powierzchni otworu.

Wyniki są z konieczności jakościowe, ale ich charakter dobrze odpowiada przebiegom naprężeń normalnych przy przeciwbieżnym wyciskaniu stopów metali, otrzymanym metodą czujników trzpieniowych w pracach [4 i 11].

Rysunek 16 obrazuje rozkład naprężeń normalnych na wewnętrznych kontaktujących się z deformowanym materiałem (czarny kolor), powierzchniach stempla. Największe naprężenia normalne obserwujemy w narożach stempla. Na powierzchni walcowej rosną one w kierunku stempla.

Również niejednorodny rozkład naprężeń normalnych obserwujemy na czołowej dolnej powierzchni stempla. Największe naprężenia normalne lokalizują się w otoczeniu osi symetrii stempla. Występuje tu jakościowa zgodność z wynikami pokazanymi na rys. 15.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiony sposób pomiaru naprężeń kontaktowych w procesach wyciskania ma charakter porównawczy, pośredni i jest z konieczności jakościowy. Umożliwia jednak szybkie przybliżone oszacowanie lokalnego rozkładu wartości naprężeń normalnych wzdłuż linii konturu matrycy i na stemplu.

Porównania przedstawionych wyników z odpowiednimi rezultatami literatury wykazały daleko idącą zgodność jakościową. Dotyczy to zarówno danych o charakterze doświadczalnym jak też teoretycznym.

Okazało się, że pokazana technika pomiaru składowych normalnych naprężeń kontaktowych umożliwia przybliżoną ilościową ocenę wielokrotności lokalnych naprężeń kontaktowych na linii konturu matrycy w odniesieniu do średniego naprężenia normalnego na stemplu.

Badania wykazały silną niejednorodność naprężeń normalnych wzdłuż powierzchni styku deformowanego materiału z narzędziem.

Interpretacja, wyników otrzymanych rozpatrywaną techniką pomiaru wzbudza najwięcej kontrowersji. Przenoszenie ich na rzeczywiste stopy metali można w najlepszym wypadku odnieść do takich materiałów, których zachowanie się w warunkach złożonych stanów naprężeń można opisać modelem czoła ciała idealnie plastycznego.

Zdając sobie sprawę ze wszystkich wątpliwości i niejasności, związanych z interpretacją wyników pomiarów naprężeń normalnych metodą czujników

отворowych, trzeba przyznać, że omówiony sposób umożliwia wyznaczenie lokalnych naprężeń kontaktowych. Może on być użyteczny na wstępnym etapie projektowania procesów wyciskania. Cechuje go prostota i niski koszt.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. W. SZCZEPIŃSKI, *Introduction to the mechanics of plastic forming of metals*, PWN, Warszawa 1979.
2. J. PIWNIK, *Analiza osiowo-symetrycznych procesów obróbki plastycznej*, Prace IPPT PAN, 44, 1985.
3. J. PIWNIK, *Analiza procesów obróbki plastycznej metali z uwzględnieniem ich wzmocnienia*, *Obróbka Plast.* 24, 4, 1985.
4. Е. Л. УНКОВ, У. ДЖОНСОН, В. Л. КОЛМОГОРОВ и др. *Теория пластических деформаций металлов*, Машиностроение, Москва 1983.
5. P. UNKSOV, YU. S. SAFAROV, *Experimental investigation of contact stresses in extrusion processes*, *Arch. Budowy Maszyn*, 20, 1, 55-66, 1973.
6. E. P. UNKSOV, *An engineering theory of plasticity*, Bulterworth-Verlag, London 1961.
7. L. DIETRICH, H. PETRYK, *Theoretical solutions of some plastic working processes in the light of experimental evidence*, *Metal forming plasticity*, IUTAM Symposium Tutzing, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, August 28-September 3, 292-304, 1978.
8. G. T. VAN ROOYEN, W. A. BACKOFEN, *Distribution of interface stress in plane strain and axial symmetric compression*, *J. Mech. Phys. Solids*, 7, 163-168, 1959.
9. J. LÖWEN, *Ein Bertrag zur Bestimmung des Reibungszustandes beim Gesenkschmieden*, Ph. D. Thesis, Technischen Universität Hannover 1971.
10. А. Я. АЛЕКСАНДРОВ, М. Х. АХТЕМЗЯНОВ, *Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела*, Наука, Москва 1973.
11. E. P. UNKSOV, YU. S. SAFAROV, *A photoelastic investigation of contact stresses in the backward extrusion process*, *Int. Mech. Sci.*, Pergamon Press, 17, 597-602, 1975.
12. R. S. DOROSZKIEWICZ, *Elastooptyka*, PWN, Warszawa-Poznań 1975.
13. *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, Z. ORŁOŚ [red.] PWN, Warszawa 1977.
14. *Mechanika techniczna, tom X, Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*, W. SZCZEPIŃSKI [red.], PWN, Warszawa 1984.
15. В. П. СЕВЕРЕДЕНКО, В. С. МУРАС, Э. Ш. СУХОДРЕВ, *Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента*, Наука и Механика, Минск 1974.
16. А. И. КОЛПАШНИКОВ, В. А. ВЯЛОВ, А. А. ФЕДОРОВ, А. П. ПЕТРОВ, *Горячее шдропрессование металлических материалов*, Машиностроение, Москва 1977.
17. J. PIWNIK, *Analiza rozkładu naprężeń kontaktowych w procesach wyciskania oparta na doświadczeniach modelowych*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 272-278, Warszawa, 3-4 grudnia 1982.
18. Р. И. НЕПЕРШИН, *Осесимметричное прессование с маленькими и большими обжатиями*, Расчеты процессов пластического течения, Наука, Москва 1973.

Резюме

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ВЫДАВЛИВАНИЯ

В публикации разработаны новые применения метода датчиков в отверстиях для измерения контактных напряжений в процессах соосного и противоосного выдавли-

ваний. Указаны новые примеры измерения нормальных составляющих напряжений на поверхностях контакта деформируемого пластилина со стенками контейнеров, матриц и штампов, изготовленных из прозрачного плексигласа. Пластилин используется как модельный материал. В боковых стенках контейнеров, а также в штампах высверлен ряд малых отверстий или канавок. В тракте выдавливания материал подвергается деформированию в результате редукции начальных сечений. Одновременно к боковым отверстиям или канавкам в контейнерах и штампах проникает деформированный материал. Локальная высота заполнения канавок считается пропорциональной локальному значению нормального напряжения. Градуировка этой зависимости проверена путем измерения силы на штампе и отвечающей ей средней высоты заполнения канавок в штампе. Исследования проведены для трех степеней редукции соосного выдавливания и четырех степеней редукции противоосного выдавливания. Метод указывает на большую чувствительность ходов-распределений нормальных напряжений на линии контура матрицы и поверхностях штампов в зависимости от степени редукции начальных размеров выдавливаемых образцов. Представленные в работе результаты имеют качественный характер и могут быть пригодными на вступительном этапе проектирования процессов выдавливания. Это касается главным образом определения количественной кратности локальных значений нормальных напряжений вдоль поверхности контакта материала с матрицами по сравнению со средними нормальными напряжениями на штампе. Метод характеризуется простотой и низкой стоимостью исследований.

SUMMARY

MODELLING OF CONTACT STRESS IN EXTRUSION PROCESSES

Hole gauges are applied to measure the contact stresses in the processes of direct and indirect extrusion. Normal stresses are measured at the contact surfaces between the deforming plasticine and the walls of containers, dies and punches made of transparent plexiglass. Tiny holes and grooves are drilled in the walls. During extrusion the material is deformed as a result of reduction of the initial cross-section, and plasticine penetrates the holes and grooves. Local filling level of the grooves is assumed to be proportional to the local value of normal stress. Calibration is performed by measuring the force acting on the punch and the corresponding average level of plasticine in the grooves. Measurements were made for four different cases of direct extrusion and three cases of indirect extrusion. Normal stress distribution at die contours and punch surfaces are found to be sensitive to the reduction ratios of initial cross-sections of the extruded specimens. The results obtained are of qualitative character, the method of testing is simple and inexpensive.

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Praca została złożona w Redakcji w dniu 17 marca 1987 r.