

Rejestracja czasu. Do zarejestrowania przebiegu zjawisk w czasie posiłkowano się jeszcze jednym oscylografem. W tym celu użyto języczkowy oscylograf Dubois, rys. 19. Oscylograf był połączony z siecią prądu miejskiego 50-cio okresowego przy pomocy transformatora o dużej przekładni. Pod wpływem zmiennego prądu języczek oscylografu, umieszczony w polu elektromagnesów, wykonywał drgania, przekazywane zapomocą cięgna niklowego na oś z przytwierdzonym lusterkiem. Promień światła, wysyłany przez silną lampę żarową, skupiony i zdiafragmowany, po odbiciu od drgającego lusterka oscylografu, przechodził przez soczewkę cylindryczną aparatu Kippa i kreślił na przesuwającej się błonie sinusoidę czasu jednocześnie z krzywami oporów skrawania i temperatur. Przez porównanie długości fali sinusoidy czasu z falą oporów skrawania i temperatur można było określić średnią częstotliwość zmian oporów skrawania i temperatur. Średnia częstotliwość wahała się od 300 do 700 okr./sek.

Opis oscylogramów.

W opisany wyżej sposób otrzymywano oscylogramy przebiegu skrawania. Na rys. 20 uwidoczniiony jest oscylogram skrawania mosiądzu. Górna krzywa przedstawia sinusoidę czasu, z której przebiegu możemy określić zarówno czas, jak i szybkość skrawania. Krzywa środkowa przedstawia opory i ich zmiany podczas skrawania, zaś krzywa dolna wskazuje zachodzące jednocześnie zmiany temperatury, przyczem daje się zauważyć wyraźny związek między zmianami oporu i temperatury.

Na oscylogramie rys. 21 widzimy w analogicznym porządku krzywe czasu, oporów skrawania i temperatur, otrzymanych przy skrawaniu żeliwa. Z krzywej czasu można wnioskować o nierównomiernym przebiegu szybkości skrawania, mimo stałego obciążenia próbki. Przyrost obciążenia („porcjowy”) wyraźnie uwidoczniiony jest w lewej części środkowej krzywej oscylogramu. Po dolaniu „porcji” (10 kg) wody przekręcano nieco bęben aparatu fotograficznego, dzięki czemu uwidoczniło się zwiększenie obciążenia. Pionowe smugi, odpowiadające poszczególnym porcjom wody, powstały wskutek prześwietlenia błony na całej jej długości podczas zatrzymania bębna.

† H. MIERZEJEWSKI

Obrabialność metali^{*)}

Obrabialność metali jest zagadnieniem, które wyrosło na gruncie praktyki przemysłowej i opiera się na różnych pojęciach, którym brak cech ściśle określonych. Praktyczne strony tego zagadnienia polegają na ustaleniu warunków, w których otrzymuje się gładkość powierzchni obrabianej, i na wyznaczeniu sił niezbędnych do wykonania operacji skrawania, pośrednie zaś — na określeniu dopuszczalnych prędkości ścinania wióra ze względu na trwałość narzędzia. Na przebieg skrawania, poza struk-

Fotografja wiórków i próbek.

Po skończonej próbie zbierano wiórki i fotografowano ich kształt od strony noża, jak również powierzchnię próbki, otrzymaną po skrawaniu. Fotografje te służyły jako materiał pomocniczy przy interpretacji krzywych na oscylogramach. Dla przykładu na rys. 22 podano w powiększeniu 8-krotnym fotografje powierzchni tej samej próbki mosiądzu skrawanej wiórem o grubości 0,6 mm (na górze) i 0,3 mm (u dołu). Rys. 23 przedstawia w powiększeniu 8-krotnym fragment wióra duraluminowego przy skrawaniu warstwy 0,6 mm i grubości próbki 3 mm. Z poszczególnych fragmentów odtwarzano obraz całego wióra. Rys. 24 uwidoczni jeden z takich przykładów dla próbki stalowej.

Przy interpretowaniu oscylogramów posiłkowano się również zdjęciami profilu powierzchni skrawanej próbki, dokonanymi na aparacie projekcyjnym w dużym powiększeniu.

Les mesures de la résistance à la coupe des métaux

Résumé

À la suite des recherches décrites dans l'article précédent et exécutées par feu M. Mierzejewski, professeur à l'Ecole Polytechnique de Varsovie, il commença des études expérimentales sur la résistance à la coupe des différents métaux.

Pour ces travaux M. Mierzejewski avait construit un appareillage permettant d'enregistrer la température au bord de l'outil, ainsi que la résistance à la coupe. Cet appareillage comprenait l'éprouvette et l'outil, serré dans un support pendulaire, ainsi que le dynamomètre à lames de charbon.

Les oscillations de la résistance électrique du dynamomètre étaient transmises à l'oscillographe Dudell qui les enregistrerait sur le film photographique. Les températures de coupe étaient enregistrées sur le même film, comme les forces thermoélectriques (conformément amplifiées) du thermo-couple, formé de l'outil et de l'éprouvette. Pour l'enregistrement du temps on employa l'oscillographe Dubois qui traçait sur le même film une sinusoïde sous l'influence d'un courant alternatif de 50 périodes par sec.

L'auteur donne une description détaillée de cet appareillage et montre des oscillogrammes obtenus à la coupe du laiton (fig. 20) et de la fonte (fig. 21).

Comme on avait préparé en outre des photographies des copeaux et des éprouvettes, l'auteur en montre aussi quelques-unes, qui servaient à l'interprétation des courbes obtenues à l'oscillographe.

turą metalu, wpływa przede wszystkim kształt i położenie narzędzia względem powierzchni obrabianej.

Systematyczne badania nad obrabialnością metali zapoczątkowane zostały przez Codron'a¹⁾. Z pośród licznych prac dawniejszych, poświęconych zagadnieniom skrawania metali, wymienić należy rozprawy Nicolson'a²⁾, F. W. Taylora³⁾,

^{*)} Wg. rękopisu ś. p. prof. Henryka Mierzejewskiego. Zebrane i przejrzane przez inż. J. Bucholtza i J. Skowrońskiego.

¹⁾ C. Codron. Expériences sur le travail des machines-outils pour les métaux. Cisailage. Poinçonnage. 1902. Forgeage 1906. Alésage 1910.

²⁾ J. Nicolson. Lathe Design. 1911.

³⁾ F. W. Taylor. On the Art of Cutting Metals. 1906.

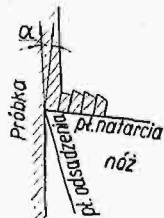
Dempster - Smith¹⁾, którzy stawiając na pierwszym planie techniczną stronę zagadnienia, jak określenie średnich oporów skrawania, interesujących konstruktorów obrabiarek, oraz prędkości skrawania, umożliwiających należyte wyzyskanie narzędzi i maszyn, nie uwzględniali jednak zagadnienia właściwej obrabialności.

Dopiero w ostatnich czasach fizyczna strona zjawisk skrawania budzić zaczyna zainteresowanie. Wymienić tu należy prace Heyn'a²⁾ nad strukturami metali w związku z ich przeróbką technologiczną, badania Rosenhain'a³⁾ nad przebiegiem skrawania i kształtem wióra, badania Herberta⁴⁾ nad temperaturami, w których ścina jest wiór, i innych.

Przy skomplikowanych z punktu fizycznego zjawiskach, jakimi są odłupywanie, bądź ścinanie wiórów z powierzchni obrabianej, należy dążyć do rozpatrywania przebiegów jaknajbardziej elementarnych. Z tych względów jest rzeczą pożądaną ograniczyć się np. do badania przebiegu skrawania przy użyciu płaskiego noża strugarzkiego, by dane przekształcenie plastyczne można było traktować, jako zagadnienie dwuwymiarowe. Doświadczenie wykazuje, że można z dostatecznym przybliżeniem urzeczywistnić taki przebieg skrawania, przy którym ruch materiału plastycznego, odpowiadający kształtowaniu się wióra, jest płaski, czyli jednakowy we wszystkich płaszczyznach próbkę prostopadłych do krawędzi tnącej noża. W tych warunkach kształt noża określany jest przez położenie powierzchni natarcia (najczęściej płaszczyzny) i płaszczyzny odsadzenia.

Kąt zawarty pomiędzy kierunkiem ruchu noża a prostopadłą do płaszczyzny natarcia nazywać będziemy (rys. 1) kątem natarcia. Kątem odsadzenia nazywać będziemy, jak zwykle, kąt między kierunkiem ruchu noża a płaszczyzną odsadzenia. Kąt natarcia należy uważać za jedyny element zasadniczy, charakteryzujący kształt narzędzia. Kąt odsadzenia, o ile nie jest zbyt mały, jest czynnikiem drugorzędym.

Biorąc nóż nieco szerszy od grubości próbki skrawanej, umożliwiamy boczne rozszerzanie się wióra, który opiera się wciąż o powierzchnię nacierania noża. W badaniach, o jakich będzie mowa poniżej, wpływ bocznego rozszerzania się wióra nie dał się odczuć w tym stopniu, by charakter płaskiego układu odkształceń plastycznych był przytem zatracony. Wyjątek stanowiły doświadczenia z nożem o dużym kącie natarcia, który dla wzmocnienia krawędzi tnącej posiadał ścięty wierz-



Rys. 1.



Rys. 2.

chołek (rys. 2). Nóż ten jest znany w technice, jako nóż Klopstocka⁵⁾, który zainicjował jego szersze stosowanie w praktyce. Przy skrawaniu zapomocą tego noża dawał się zauważyć boczny wytrysk materiału plastycznego w pobliżu krawędzi tnącej, odpowiadający szerokości paska ścinowego. Nawet i w tym wypadku można mówić o płaskim przebiegu skrawania ze względu na lokalizację wytrysku i na małe rozszerzanie się wióra poza omawianym wytryskiem.

Jak to w swoim czasie słusznie podniósł Taylor, najpoważniejszą trudność przy wyznaczaniu prędkości lub oporów skrawania stanowi klasyfikacja materiału obrabianego. Zaproponowana przez Taylora normalizacja materiałów obrabianych na podstawie wyznaczania typowych prędkości toczenia okazała się najzupełniej niepraktyczną z punktu widzenia ogólnej realizacji przemysłowej. Jednostronny, skrajnie utylitarny punkt widzenia przy ujmowaniu celów normalizacji nie pozwolił Taylorowi dojrzeć kruchości podstaw, na jakich próbował ją oprzeć.

Struktury metali i ich stopów używanych w przemyśle są nader różnorodne i stąd ich klasyfikacja napotyka na zasadnicze trudności. To też w doświadczeniach jest rzeczą celową oprzeć się przede wszystkim na strukturach najprostszych, jakie widzimy w metalach czystych o określonej budowie krystalicznej. Prawda, że i w tym wypadku mamy do czynienia z ciałami quasi-izotropowymi, jednak poszczególne krystality są indywidualami ściśle określonymi pod względem struktury. Ze stopów metalowych lepiej ograniczyć się przede wszystkim do tych, które posiadają specjalne cechy w zakresie obrabialności, aby z ich znanej struktury wyprowadzić wnioski co do zależności, zachodzącej pomiędzy strukturą a przebiegiem skrawania.

Obok właściwej struktury mamy do czynienia z zagmatwaną niekiedy budową mikrograficzną stopów o kilku składnikach lub z tektoniką materiału, wynikającą z technologicznych metod odlewania lub przekuwania materiału. I w tym wypadku przy dzisiejszym stanie badań nad obrabialnością lepiej jest poprzestać na zbadaniu najbardziej charakterystycznych przykładów, znanych z praktyki przemysłowej.

Zmienne pola odkształceń i naprężeń przy skrawaniu dwuwymiarowym.

Wszyscy dotychczasowi eksperymetatorzy z zakresu obrabialności metali zgadzają się co do tego, że pomiędzy oporami właściwymi skrawania a klasycznymi współczynnikami wytrzymałościowymi, jak granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie, zginanie, twardość i t. d., niema wyraźnej zależności. Również właściwa praca skrawania i uwarunkowany przez

¹⁾ Dempster-Smith. Experiments upon Forces acting on Twist-Drills when operating on Cast-Iron and Steel. 1909.

²⁾ E. Heyn. Die technischen wichtigen Eigenschaften der Metalle und Legierungen. Hndb. der Materialkunde. 1912.

³⁾ W. Rosenhain. Experiments on the Cutting of Metals. Proc. Inst. Mech. Eng. 1925.

⁴⁾ E. G. Herbert. The Measurement of Cutting Temperatures. Proc. Inst. Mech. Eng. 1926.

⁵⁾ Kessner. Die Prüfung der Bearbeitbarkeit der Metalle und Legierungen, unter besonderer Berücksichtigung des Bohrverfahrens. 1918.

⁶⁾ Klopstock. Die Untersuchung der Dreharbeit. Berlin 1926.

nią wzrost temperatury nie znajduje odpowiednika w charakterystykach wytrzymałościowych.

Przebieg skrawania wióra wyjaśnia nam ten stan rzeczy. Mianowicie pola odkształceń, a tem samem i naprężeń, przy skrawaniu dwuwymiarowym, są bardzo charakterystyczne, a zarazem różnią się zasadniczo od pól, z jakimi mamy do czynienia przy wszystkich stosowanych dotychczas próbach wytrzymałościowych, tak klasycznych, jak i technologicznych. Stąd też próba skrawania musi być traktowana oddzielnie. Jej indywidualne cechy wytrzymałościowe muszą być wyodrębnione, by następnie na podstawie zachowania się różnorodnych struktur można było przeprowadzić ich klasyfikację z punktu widzenia obrabialności.

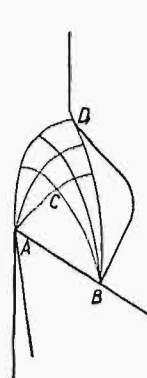
Zagadnienie komplikuje się wskutek tej okoliczności, że przy próbie skrawania mamy do czynienia ze zmiennym polem odkształceń. Przytem odkształcenia trwałe, poza granicą plastyczności, wywołują zmiany własności mechanicznych metali, wyrażające się w t. zw. stwardnieniu (zgnioście). Ujęcie w schemat teoretyczny najbardziej charakterystycznych pól odkształceń w poszczególnych fazach tworzenia się wióra natrafia z reguły na nieprzezwyciężone przeszkody w dziedzinie analizy matematycznej. W większości przypadków możemy posługiwać się jedynie analogjami, lub przybliżeniami, co związane jest zawsze z możliwością omyłek. Możemy również rozpatrywać pewne fragmenty pola odkształceń przy próbie skrawania, jak np. otoczenie tworzącego się pęknięcia, które odgrywa zasadniczą rolę w tej próbie.

Przejdźmy do omówienia przeszkód, następczących się przy schematyzowaniu ruchu plastycznego w obszarze skrawania. Istnieje, jak wiadomo, kilka metod eksperymentalnych postępowania w zagadnieniach pokrewnych, dotyczących zresztą przypadków bardziej elementarnych¹⁰⁾. Polegają one na wykrywaniu linii poślizgowych bądź na powierzchni metalu, bądź wewnątrz, przy zastosowaniu różnych sposobów trawienia, lub też na wykrywaniu rekrytalizacji. Natomiast brak nam dotychczas ogólnej metody teoretycznej, która pozwoliłaby przewidzieć i wyznaczyć kształt krzywych poślizgowych na podstawie własności plastycznych danego materiału przy danych warunkach brzegowych.

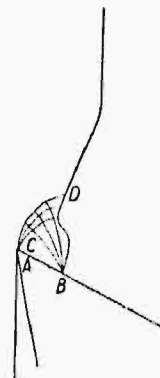
Zastosujemy naprzód empiryczną metodę wyznaczania linii poślizgowych, zapoczątkowaną przez *Rejtö'go*¹¹⁾, a rozwiniętą przez *Prandtl'a*, przewidując, że będą to proste, łuki kół, czy spirale logarytmiczne, jak to przewidywała teoria plastyczności w pierwszej fazie swego rozwoju. Przy schematyzowaniu zjawiska będziemy się liczyć z jednej strony z obserwacjami bezpośrednimi, z drugiej zaś z rozważaniami, mającemi uzasadnienie teoretyczne. Metodę powyższą zastosujemy narazie do t. zw. ciała idealnie plastycznego, praktycznie biorąc za punkt wyjścia bardzo miękkie żelazo, stanowiące jeden z najbardziej

zasadniczych materiałów w badaniach z zakresu plastostastyki.

Rys. 3 przedstawia układ krzywych poślizgowych, stanowiący pierwsze przybliżenie, a uwzględniający obok pewnych założeń teoretycznych wyniki bezpośrednich obserwacji skrawania. O tem, że punkt *A* stanowił węzeł linii poślizgowych, które przynajmniej w pobliżu tego punktu można uważać za pęk prostych, nie należy wątpić, gdyż decyduje o tem kierunek przesunięcia noża względem materiału. W punkcie *B* zjawia się również promieniowy układ naprężeń, doprowadzający do przesunięcia, przewidzianego teoretycznie przez *Nadair'a*¹²⁾. Kąt *ABC* wynosi przytem około 45°, zależnie od współczynnika tarcia materiału o nóż.



Rys. 3.



Rys. 4.

Ten prosty schemat nie odpowiada jednak dokładnie rzeczywistości. Istnienie trójkąta *ABC*, odgrywającego rolę klina, utworzonego z materiału, nie podlegającego w danej chwili odkształceniom i przesuwaneemu razem z nożem, jako do pewnego stopnia sztywna całość, jest problematyczne. W punkcie *C* nie daje się zauważyć ostrego kąta przy krzyżowaniu się linii poślizgowych. Linia *ACB* nie wydaje się być łamaną, a naodwrot — zawsze krzywą, łagodnie zmieniającą swą krzywiznę. Wydaje się również, że w pobliżu punktu *B* krzywe poślizgowe zanikają we wszystkich fazach tworzenia się wióra.

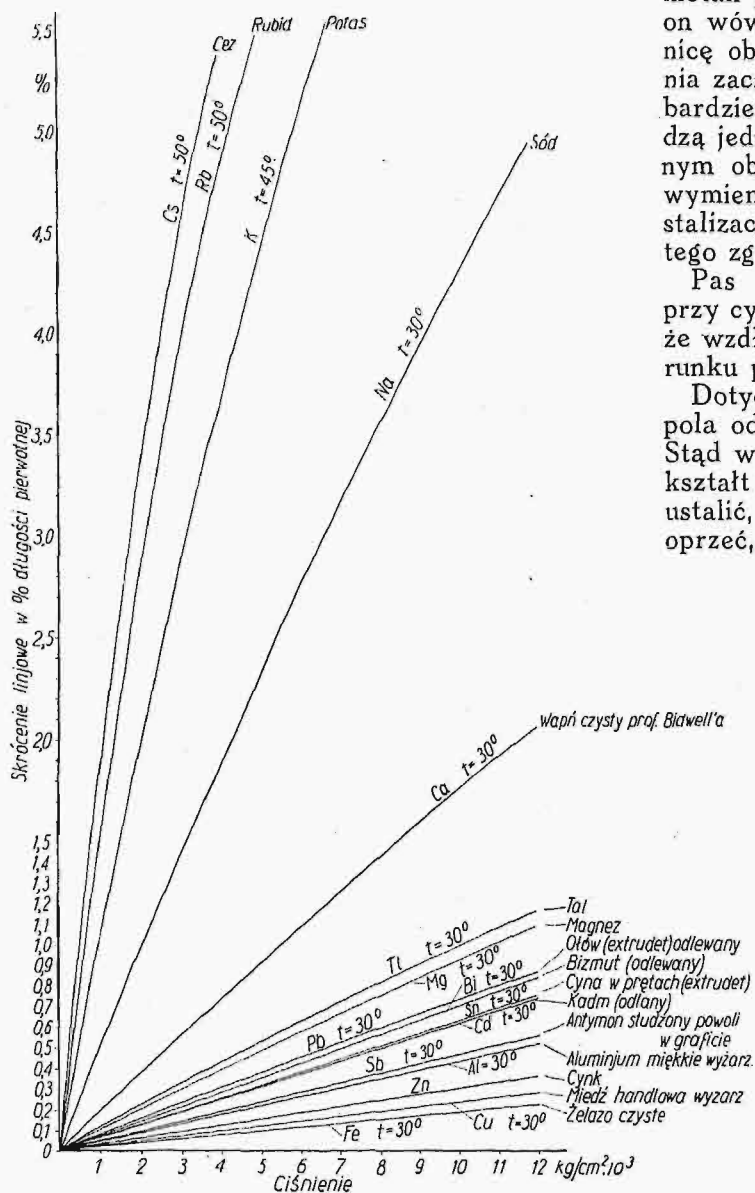
O tem, że schemat przedstawiony na rys. 3 nie odpowiada końcowej fazie tworzenia się wióra odłupywanego, przekonywa nas względ następujący. Po odłupaniu płytki nóż skrawa warstwę o wzrastającej grubości (rys. 4). Zgniot zjawia się w pobliżu punktu *B* w chwili, gdy odcinek *AB* jest bardzo mały. To też materiał, wypełniający obszar *ABC*, jest stale utwardzony i trudno przewidywać w nim tworzenie się wciąż nowych linii poślizgowych.

Przy wiórze odłupywanym nie ulega, zdaje się, wątpliwości fakt istnienia obszaru *ABC*, w którym materiał nie odkształca się praktycznie, a przesuwa się mniej więcej jako sztywna całość wzdłuż kierunku *AB*. Do tego wniosku skłania nas przeświadczenie o utwardzeniu tego materiału w stosunku do materiału dziewiczego, jaki napływa z góry na nieruchomy nóż. Obszar *ABC* można też traktować jako jądro, w którym zmagazynowana została niekiedy dość znaczna ilość energii sprężystej, co wynika z mniejszej lub większej ścisłości danego metalu. O istnieniu

¹⁰⁾ *Mierzejewski H.* Podstawy mechaniki ciał plastycznych. 1927.

¹¹⁾ *A. Rejtö.* Die innere Reibung der festen Körper, als Beitrag zur theoretischen mechanischen Technologie. 1897.

tej energii sprężystej przekonywa nas intensywne odpryskiwanie wiórów z takich materiałów, jak magnez, mosiądz automatowy, twarde stale i t. d. Ponadto ciśnienia, panujące w obszarze ABC, sięgają — jak wiadomo — kilkunastu i kilkadziesiąt tysięcy atmosfer. Doświadczenia *Bridgman'a*¹²⁾ wykazują, że w tych warunkach należy się liczyć ze ściśliwością metali nawet o wyższej temperaturze krzepnięcia. Rys. 5, przedstawiający zmniejszenie objętości metali przy różnych ciśnieniach hydrostatycznych, obliczone na podstawie wyników prac *Bridgman'a*, wykazuje, że linjowe skurczenie większości metali sięga kilku procentów, a dla stali wynosi około pół procentu. Należy uważać przytem, że nie znamy wartości ciśnień w poszczególnych punktach obszaru ABC, a domyślamy się, że rosną one raptownie w miarę zbliżania się ku środkowi odcinka AB. Z chwilą gdy odłupana płytka wiórowa przesunie się wzdłuż AB i zostanie uwolniona od nacisku materiału, napływającego z góry, nagromadzona



Rys. 5.

¹²⁾ *Bridgman P. W. The Compressibility of Thirty Metals as a Function of Pressure and Temperature. 1923.*

energia sprężysta bądź wywołuje odprysnięcie wióra, bądź też, w wypadku metalu bardziej plastycznego, jest jednym z czynników związania się wióra według określonego promienia krzywizny.

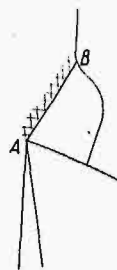
Przy wiórach ciągłych, odpowiadających metalom bardziej plastycznym, jak miedź lub żelazo miękkie, jednak ulegających zgniotowi, widzimy wyraźnie, że krzywa BA (rys. 6), oddzielająca obszar utwardzony od obszaru wydatnych odkształceń plastycznych, kończy się w punkcie B na górnej zewnętrznej powierzchni wióra. Innymi słowy, obszar odkształceń plastycznych w danej chwili obejmuje jedynie pas, oddzielający wiór od masy metalu dziewiczego. W punkcie B widzimy ostre załamanie konturu przy przejściu od powierzchni próbki do zewnętrznej strony wióra.

Pas AB daje się zaobserwować przy skrawaniu metali plastycznych, jak cyna, ołów, kadm. Jest on wówczas szerszy, a raczej trudno ustalić granicę obszaru wydatnych przesunięć. Odkształcenia zaczynają się głębiej w masie próbki, stają się bardziej intensywne wzdłuż krzywej AB, zachodzą jednak w dość znacznym stopniu i we właściwym obszarze wióra. Objasnić to można tem, że wymienione metale podlegają raptownej rekrytalizacji przy temperaturze skrawania i wskutek tego zgniot jest zjawiskiem przejściowym.

Pas AB występuje nader charakterystycznie przy cynku. Film przebiegu skrawania wykazuje, że wzdłuż prostej AB następuje nagła zmiana kierunku przesuwania materiału.

Dotychczas staraliśmy się scharakteryzować pola odkształceń, nie badając rozkładu naprężeń. Stąd wynika dowolność, z jaką traktowaliśmy kształt krzywej ACB (rys. 3) lub AB (rys. 6). Aby ustalić, na jakich przesłankach należałoby się oprzeć, by ten kształt ściślej wyznaczyć, musimy zdać sobie sprawę z rozkładu naprężeń w całym obszarze, poprzestając na pierwszych przybliżeniach ze względu na skomplikowane schematy odkształceń.

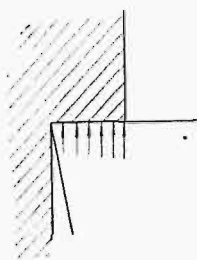
Jedną z metod, prowadzących do celu, jest przeanalizowanie typowych układów sprężystych, odpowiadających poszczególnym fazom skrawania dwuwymiarowego. Prawda, że pola naprężeń, odpowiadających rzeczywistym odkształceniom plastycznym, różnią się bezwzględnie od pól naprężeń, wyznaczonych na podstawie rozwiązania danego płaskiego zagadnienia sprężystościowego. Pomimo to, rzeczywiste pola naprężeń uważać można z dużym przybliżeniem za zwyrodnienie układów sprężystych, od których nie odbiegają one zbyt, jak to mieliśmy sposobność omówić na innym miejscu.



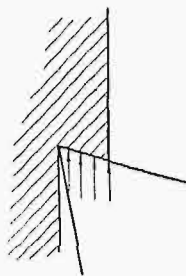
Rys. 6.

¹³⁾ *H. Mierzejewski. Podstawy mechaniki ciał plastycznych. Str. 92.*

Mniejsze znaczenie posiadają przytem pola naprężeń, odpowiadających początkowej fazie skrawania dla różnych kątów natarcia noża. Bez porównania ważniejsze byłoby wyznaczenie pól naprężeń dla wypadków obciążenia, przedstawionych na rys. 7 i 8. Rozwiązanie ściśle nastrożone



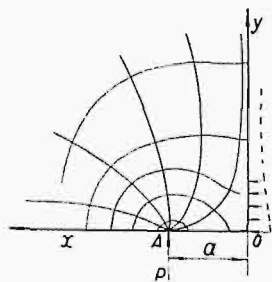
Rys. 7.



Rys. 8.

tu wielkie trudności, wobec czego zmuszeni jesteśmy posługiwać się tu analogjami i przybliżeniami, nie mając przytem pewności, czy nie popełniamy błędów wskutek mylności założeń. Jedyną kontrolę stanowi w danym wypadku doświadczenie i bezpośrednia obserwacja.

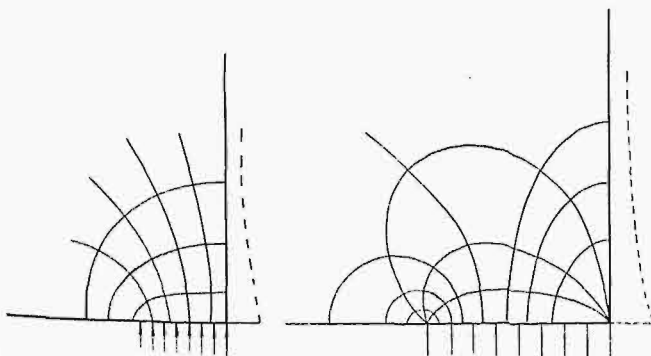
W wypadku siły skupionej, działającej na róg prostokątny (rys. 9) w odległości $OA = a$ od początku osi współrzędnych, otrzymujemy trajektorje naprężeń głównych w postaci ortogonalnych hyperbol i lemniskat. Metoda odwzorowania podobnego, której zastosowanie względem promieniowego układu naprężeń prowadzi do rozwiązania danego zagadnienia, przewiduje zjawienie się na części



Rys. 9.

konturu, a mianowicie wzdłuż osi y-ów, naprężeń normalnych.

Znosząc te dodatkowe naprężenia, wywołujemy przesunięcia trajektorji, otrzymując tym sposobem właściwy rozkład naprężeń na rys. 8.

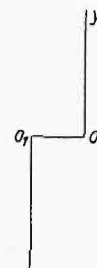


Rys. 10.

Rys. 11.

Siła skupiona P , którą można uważać według zasady St. Venant'a za równoważną obciążeniu równomiernemu na małym odcinku po obu stronach punktu A , odpowiada obciążeniu materiału w pierwszej chwili wchodzenia weni noża.

O ile kąt natarcia noża jest równy zeru, pole naprężeń jest inne. O jego charakterze można się dowiedzieć, porównując dwa układy pokrewne, odpowiadające różnym warunkom brzegowym (rys. 10 i 11). Inaczej przedstawiają się pola naprężeń w wypadku, gdy kontur składa się z dwóch półprostych nieograniczonej długości, połączonych odcinkiem prostej OO_1 (rys. 12). Przykład powyższy odpowiadać będzie przesunięciu noża o zerowym kącie natarcia, przylegającym do próbki na całej długości odcinka OO_1 . Niech to przesunięcie równa się stałej wielkości $= b$. Założmy natomiast, że cząsteczki próbki wzdłuż osi x-ów na lewo od punktu O , są powstrzymane w ruchu przez materiał poniżej tej osi tak, że ich przesunięcia są równe zeru.



Rys. 12.

Zagadnienie powyższe daje się rozwiązać przy pewnych założeniach najzupełniej ściśle, przyczem jednak przewidujemy obecność obciążeń normalnych wzdłuż osi $x = 0$ według wartości oznaczonych na rys. 12¹⁴⁾. Obciążenia te można uważać jako przybliżone oddziaływanie części zepchniętego na bok wióra. Trajektorje naprężeń głównych przedstawiają się wówczas w postaci zobrazonej na rys. 12.

Rys. 13 przedstawia znowu układ wartości maksymalnych naprężeń stycznych¹⁵⁾. Widzimy tu, że w punkcie O_1 zlokalizowane są naprężenia styczne, i tu należy spodziewać się powstania nieciągłości lub pęknięcia wzdłuż linii O_1M .

Raz ukształtowana nieciągłość lub pęknięcie decyduje wskutek lokalizacji naprężeń o charakterze pola odkształceń przy stopniowym skrawaniu. Na uwagę zasługuje przytem zachowanie się danego metalu w pobliżu punktu, w którym schodzą się dwie wargi pęknięcia. Wzdłuż tych warg niema naprężeń stycznych, które natomiast skupiają się w końcu pęknięcia. W miarę posuwania się pęknięcia naprężenia styczne wędrują wzdłuż warg i wywołują tworzenie się fałdy wewnętrznej, której zasięg zależy od spójności danego metalu. W bardzo ciągliwych materiałach, jak np. w stali manganowej, fałda ta zwiększa się do tego stopnia, że uniemożliwia dalsze skrawanie. Wzrost oporu skrawania jest tak duży, że krawędź noża nie wytrzyma go i pęka.

Charakterystyczne cechy ruchu plastycznych ośrodków metalowych.

Początkowe i końcowe okresy skrawania wióra płaskiego, gdy nóż zaczyna wchodzić lub wychodzić z materiału, różnią się zawsze od właściwych ustalonych przebiegów skrawania. Obserwacja skrawania bezpośrednia, lub zarejestrowana za pośrednictwem filmu kinematograficznego, wykresy oporów skrawania, zmian temperatury i t. d. wskazują, że przebieg skrawania stabilizuje się szybko, przyjmując charakter zjawiska regularnego.

¹⁴⁾ Woryginalie ani obciążenie ani układ trajektorji nie są zaznaczone na rysunku.

¹⁵⁾ Rysunku niema.

go, a zarazem typowego dla danego kształtu noża i materiału. Tyczy się to zarówno wióra ciągłego, jak i odłupywanego. W ostatnim przypadku mamy do czynienia z przebiegiem okresowo zmiennym, jednak regularnym, wykazującym dość rzadko poważniejsze fluktuacje. Anomalie wykazują jedynie metale kruche. Pomimo to, skrawanie poszczególnych metali kruchych należy uważać za zjawisko do pewnego stopnia regularne, charakteryzujące dany metal.

Badanie ruchu ośrodka plastycznego w obszarze tworzenia się wióra nie może ograniczyć się wszakże do przebiegów ustalonych, gdyż właśnie okresy wstępne i końcowe dają nam możliwość zapoznania się z mechanizmem stopniowych odkształceń, rzucającym wiele światła na własności i zachowanie się poszczególnych metali.

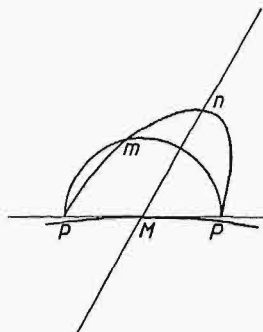
Znajomość pól odkształceń i naprężeń nie wystarczy do zrozumienia przebiegu skrawania. Konieczna jest znajomość chociażby bardzo przybliżonych praw ruchu plastycznego ośrodka.

Przy skrawaniu metali plastycznych, zwłaszcza czystych i jednorodnych, zaobserwować można wyodrębnienie się obszaru odkształceń plastycznych, uwydatniające się przez zmatowienie powierzchni odpolerowanej. Jako przykład służyć może rozpoczęcie skrawania bardzo miękkiego żelaza. Widzimy, że warstwa materiału, pozostającego po zdjęciu wióra, jest zgnieciona na dość znacznej głębokości. Zgniot plastyczny wyraża się również często w postaci brózd poślizgowych, wchodzących dość głęboko w obszar struktury dziewiczej. Powstawanie takich brózd poślizgowych uwarunkowane jest zlokalizowaniem naprężeń krytycznych w wąskich pasach, przyczem obszary, znajdujące się po obu bokach brózd, przesuwały się, pozostając same w dziedzinie małych odkształceń. W tym wypadku jest rzeczą słuszną uważać kontur złożony również z brzegów brózd poślizgowych za granicę obszaru zgniotu. Jeśli brózd poślizgowych są liczne, wąskie i krzyżują się wzajemnie, za granicę obszaru zgniotu należy uznać linię zasięgu brózd poślizgowych. Linia, odgraniczająca obszary struktury dziewiczej i zgniotu, jest wówczas bardziej nieokreślona. Należy zauważyć wszakże, że kontur, ograniczający obszar zgniotu dla ciała quasi-izotropowego, jest zawsze krzywą przybliżoną, nawet wówczas, gdy mamy do czynienia z mikroskopijnymi brózdami poślizgowymi.

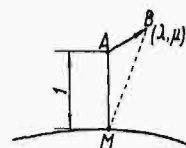
Spróbujmy stanąć na stanowisku makroskopowym i przyjmijmy, że powierzchnia, odgraniczająca obszar zgniotu od obszaru struktury dziewiczej, jest powierzchnią gładką, nie wykazującą raptownych zmian krzywizny. Będzie to powierzchnia nieciągłości, jaką stwierdzamy przy przechodzeniu z jednego obszaru do drugiego, rozpatrując bądź przesunięcia chwilowe, bądź naprężenia. Ustalenie charakteru tej nieciągłości, chociażby w najprostszych przypadkach ruchu ośrodka plastycznego, posiadałoby znaczenie dla zrozumienia istoty zgniotu. Pośrednio sprawdzilibyśmy hipotezę wyraźnego rozgraniczenia obszarów zgniotu i struktury dziewiczej. Jeśli hipoteza powyższa jest słuszną, mamy prawo zastosować tu klasyczne metody badania ruchu nieciągłości z punktu widzenia

kinematycznego, ustalone przez *Kelvin'a*¹⁶⁾ i *Hadamard'a*¹⁷⁾.

Biorąc dostatecznie mały element ośrodka izotropowego w pobliżu punktu, znajdującego się na powierzchni nieciągłości, rozpatrujemy takie odkształcenia, które początkową kulę zamieniałyby na elipsoidę, przyczem przekrój kołowy elipsoidy zajmowałby ściśle położenie wielkiego koła kuli, znajdującego się na powierzchni. W zagadnieniu dwuwymiarowym (rys. 14) odkształcenie polega na tym, że połowa koła PmP przechodzi w połowę elipsy PnP , przyczem podstawa PP , znajdująca się

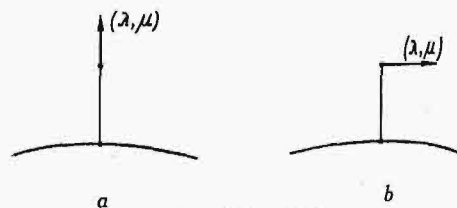


Rys. 14.



Rys. 15.

na krzywej nieciągłości, pozostaje bez zmiany. Przesunięcia, jakim odpowiada omawiane odkształcenie, najlepiej przedstawić można zapomocą t. zw. odcinka charakterystycznego, czyli wektora, przyłożonego do punktu, znajdującego się w odległości $= 1$ od rozpatrywanego elementu krzywej nieciągłości, a odciętego w kierunku normalnej zewnętrznej (rys. 15). Wektor ten oznacza, że punkt A , znajdujący się w odległości $AM = 1$, po odkształceniu zajmie położenie B , odpowiadające końcowi odcinka charakterystycznego. Jeśli nieciągłość omawiana jest pierwszego rzędu, poszczególne elementy prostopadłej MA zajmą położenie na prostej MB . Wprowadzenie pojęcia odcinka charakterystycznego przy rozpatrywaniu nieciągłości ułatwia w wysokim stopniu rozważania. Jeśli odcinek charakterystyczny posiada kierunek prostopadły (rys. 16a), mamy do czynienia z nagłą dylatacją ośrodka. Jeśli odcinek charakterystyczny jest prostopadły względem normalnej (rys. 16b), mamy do czynienia z poślizgiem.



Rys. 16 a i b.

Obok nieciągłości pierwszego rzędu, można w analogiczny sposób zdefiniować nieciągłości rzędów wyższych, jak również zerowe, czyli bezwzględne. Te ostatnie polegają na przesuwanie się obu obszarów wzdłuż powierzchni nieciągłości. W przypadku nieciągłości rzędu drugiego mamy do czynienia z takim przekształceniem w pobliżu krzywej nieciągłości, że proste prostopadłe do niej przechodzą w odcinki parabol.

¹⁶⁾ Lord Kelvin and Tait. Treatise of Natural Philosophy.

¹⁷⁾ J. Hadamard. Leçons sur la propagation des ondes.

Każdemu punktowi krzywej nieciągłości odpowiada odcinek charakterystyczny. Zbiór odcinków charakterystycznych, odpowiadających poszczególnym punktom krzywej nieciągłości, określa odkształcenie w nieskończenie wąskim pasie, przylegającym bezpośrednio do krzywej nieciągłości.

Powstaje pytanie, czy tego rodzaju schemat, obmyślony dla ciała izotropowego, a będący, jak wiadomo, punktem wyjścia dla teorii fali, czyli ruchu nieciągłości w ośrodkach gazowych, ciekłych i sprężystych, odpowiada warunkom ciała quasiizotropowego w wypadku wyraźnego rozgraniczenia obszarów zgniotu i struktury dziewiczej? Nasuwają się tu dwie wątpliwości. Jedną stanowi fakt krzyżowania się brózd poślizgowych, które przecinają nieraz pod kątem zbliżonym do $\pm 45^\circ$ oraz do -45° czoło linii posuwającego się naprzód zgniotu. Powstawanie brózd poślizgowych, krzyżujących się wzajemnie, przeczy zasadzie stopniowej zmiany kierunku odcinka charakterystycznego wzdłuż krzywej nieciągłości. Krzyżowanie się brózd wskazuje na możliwość istnienia odcinków charakterystycznych o przeciwnych kierunkach dla punktów krzywej znajdujących się w bliskiej odległości wzajemnej. Drugą wątpliwość budzi w nas przeświadczenie, że nie mamy tu do czynienia bynajmniej z przesunięciami znikomo małymi. Naodwrot, wydaje się słusznym zapatrywanie, że charakterystyczną cechą ruchu ośrodków plastycznych jest zlokalizowanie wydatnych przesunięć w pewnym obszarze przejściowym, dzielącym obszar właściwego zgniotu od obszaru struktury dziewiczej. Tym sposobem zakwestjonowane zostaje istnienie wyraźnej powierzchni nieciągłości. Jej miejsce zastępuje pojęcie pasa dużych trwałych przesunięć, zmieniających strukturę materiału. Pas ten przesuwa się naprzód na podobieństwo fali. Gdyby szerokość pasa można było uważać za wielkość nieskończenie małą, być może, że udałoby się przesuwanie nieciągłości ująć w równania ruchu falowego przy zastąpieniu czasu przez odpowiedni inny parametr¹⁸⁾. Charakter równań różniczkowych o po-

chodnych cząstkowych drugiego rzędu, a mianowicie typu hyperbolicznego, z jakimi mamy do czynienia w zagadnieniach mechaniki ciał plastycznych, usprawiedliwia tego rodzaju postawienie sprawy.

Rozważania powyższe, zawierające, być może, wiele dowolności ze względu na brak dostatecznych danych doświadczalnych, przytaczamy ze względu na doniosłość zagadnienia zgniotu i związanego z tem stwardnienia materiału. Rozwiązanie zagadnień tego typu wymaga równoległego ujmowania zjawisk z punktu widzenia makroskopowego i zmian struktury podstawowej, jaką nam daje znajomość własności mechanicznych pojedynczych kryształów metali.

Sur la travaillabilité des métaux

Résumé

Après avoir défini le problème de la travaillabilité des métaux et rappelé les recherches précédentes de Cordon, Nicolson, Taylor et Dempster-Smith, ainsi que celles de Heyn, Rosenhain et Herbert, qui s'occupait de l'aspect physique du problème, l'auteur montre les difficultés résultant de la complexité du problème (construction de l'outil, classification du matériel usiné, sa structure, le champ variable des déformations et des tensions etc.).

Ensuite l'auteur passe à la schématisation du mouvement plastique dans le milieu de coupe et applique d'abord la méthode empirique pour la détermination des lignes de glissement, initiée par Rejtö et développée par Prandtl. Il discute un schéma (fig. 3) basé sur certaines suppositions théoriques et sur quelques résultats des observations de la coupe, et le développe ensuite tenant compte de l'écroutissage, du détachement du matériel du copeau sous l'action d'une pression énormément élevée etc.

Passant à l'analyse de la distribution des tensions dans le champ des déformations, il montre les trajectoires des tensions principales pour quelques cas spéciaux.

Ensuite l'auteur soumet à examen les phénomènes de la coupe au moment initial, quand le copeau commence à se former, c. à d. quand le procédé est inconstant. Il attire l'attention sur l'existence d'une zone écoulee qu'on peut reconnaître par sa surface mate sur l'éprouvette polie. L'auteur se pose la question de définir cette zone, c. à d. la surface de discontinuité qui la limite. Il examine les déformations qui transforment une demi-sphère dans un demi-ellipsoïde de même base et caractérise les déplacements par des vecteurs (lignes caractéristiques) qui définissent la dite surface de discontinuité.

¹⁸⁾ E. et F. Cosserat. Théorie des corps déformables. Str. 154.

† H. MIERZEJEWSKI

Pola naprężeń i odkształceń przy wtlaczaniu płaskiego stempla w materiał^{*)}

Zagadnienie wtlaczania płaskiego stempla w materiał uznał Prandtl¹⁾ za podstawowe w teorii plastyczności, uważając je za punkt wyjścia do określenia twardości ciała plastycznego. Równocześnie zaznaczył on, że istnieje wyraźna zależność pomiędzy wtlaczaniem stempla w materiał a przebiegiem skrawania. Przewidywany przez Prandtla schemat naprężeń i odkształceń w

początkowej fazie wtlaczania stempla nie odpowiada jednak rzeczywistości, jak to wykazały doświadczenia Sachs'a²⁾ i innych. Aby go wyznaczyć, należy, naszym zdaniem, przyjąć za punkt wyjścia przede wszystkim pole naprężeń i odkształceń sprężystych, które ulega stopniowemu zwyrodnieniu po przekroczeniu granicy plastyczności³⁾.

Pole naprężeń i odkształceń sprężystych, odpowiadające istotnie początkowej fazie wtlaczania

^{*)} Według rękopisu ś. p. Prof. Henryka Mierzejewskiego. Zebrane i przejrane przez inż. J. Buchholtza i inż. J. Skowrońskiego.

¹⁾ L. Prandtl. Ueber die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit der Schneiden. ZAMM, 1, 15, 1921.

²⁾ Beitrag zum Härteproblem. Naturwissenschaften 14, 1219, 1926.

³⁾ H. Mierzejewski. Podstawy mechaniki ciał plastycznych, str. 92.