

Badania odkształceń zapomocą promieni Roentgena.

Widoki zastosowania promieni Röntgena do rozwiązywania zagadnień technicznych. Badania aluminium, dokonane przez J. Czochralskiego. Röntgenogramy kryształów soli kamiennej przed i po zgięciu. Röntgenogramy ciał bezpostaciowych. Zmiany zdjęć röntgenograficznych pod wpływem zwiększenia ilości kryształów w polu promieni oraz zwiększenia grubości warstwy. Wpływ obu tych czynników jednocześnie.

Promienie Röntgena stały się, jak wiadomo, potężnym środkiem badawczym w medycynie oraz w dziedzinie badania budowy atomów. Odkrycie tych promieni wywołało nadzieje, iż za ich pomocą uda się przeprowadzić również szereg doniosłych badań z zakresu inżynierii praktycznej, jak np. badań pęknięć, miejsc spawanych, różnych uszkodzeń metalu, jam usadowych i t. p.

Przez długi czas jednak nie udawało się wykorzystać promieni Röntgena do rozwiązania tych i im podobnych zagadnień technicznych, a nawet bliższe poznanie tych promieni, w miarę zastosowania ich w medycynie, rozwiązało niekóre pierwotne nadzieje.

Stopniowo jednak prace doświadczalne, przez wielu uczonych prowadzone, wyjaśniały możliwości wyzyskania promieni Röntgena i doprowadzały do pewnych wniosków, oświeclających zagadnienia budowy materii i wpływu rozmaitych objawów działania sił zewnętrznych (zginania, zgniotu, ścinania i in.) na budowę atomu.

Obfitość prac tych nie pozwala ująć ich wszystkich w ramach artykułu, dlatego też ograniczamy się do streszczenia pracy, podanej w czasopiśmie *Engineering* (14 grudnia, 1923 r.), która zaznajaia z niektórymi wynikami doświadczeń jednego z najbardziej znanych badaczy z tej dziedziny, J. Czochralskiego¹⁾ (z Frankfurtu).

Prace Czochralskiego oparte były na metodzie röntgenogramów Laue'go, zapoczątkowanej w roku 1912. Sądzone wówczas, że promienie Röntgena podlegają tym samym prawom, które były znane dla promieni świetlnych, różniąc się od tych ostatnich tylko długością fali. Barkla stwierdził, że promienie Röntgena ulegają rozszczepieniu, podobnie jak promienie słoneczne. Nie otrzymano jednak interferencji ani dyfrakcji tych promieni.

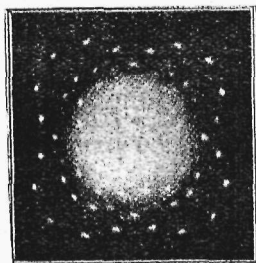
Siatka dyfrakcyjna Rowland'a posiada około 1700 linii na długości 1 mm, i taka gęstość wystarcza do wywołania interferencji między falami przepuszczanymi a odbitymi. Lecz gęstość ta okazała się o wiele niewystarczającą dla badań zapomocą promieni Röntgena, które, jak wiadomo, posiadają fale 1000 razy krótsze od światła zwykłego. Laue podał myśl, że krystaliczne ugrupowania atomów winny zachować się względem promieni Röntgena tak, jak siatka dyfrakcyjna zachowuje się względem promieni światła. Stała takiej siatki atomowej może być obliczona na podstawie ciężaru drobinowego danego ciała, jego gęstości, ilości drobin i danych krystalograficznych. Przy odpowiedniej długości fal, zgodnie z doświadczeniami Pohla, Sommerfelda i innych, siatka taka powoduje istotnie rozszczepienie promieni Röntgena. Obliczenia powyższe są nader skomplikowane, albowiem w danym wypadku mamy do czynienia z siatką trójwymiarową, podczas gdy w zwykłych siatkach mamy jeden tylko wymiar, a w krzyżowych — dwa.

Przewidywania Laue'go całkowicie potwierdziły doświadczenia W. Friedrich'a i P. Knipping'a. Gdy cienka wiązka promieni Röntgena pada normalnie do kryształu, wokół którego mieści się szereg płyt fotograficznych, wówczas na płycie umieszczonej mniej więcej na odległości 25 mm za kryształem, środek miejsca wystawionego na działanie promieni wychodzi czarno i jest otoczony zespołem czarnych punktów, ułożonych symetrycznie na obwodach kół spółśrodkowych; gdy promień skierujemy ukośnie, kolisty układ punktów zamienia się na eliptyczny. Punkty te wska-

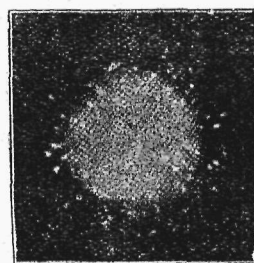
zuja maxima interferencji, odpowiadające przecięciom stożkowych powierzchni promieniowania kilku atomów.

Pierwsze sprawozdanie, odczytane przez Laue'go w Bańskiej Akademii w r. 1912, wspomniało o kilku punktach, odnajdywanych kilkakrotnie przez różnych badaczy. Próbowano różnych kryształów, całych i sproszkowanych. Brano też pod uwagę zjawiska cieplne, zachodzące w miejscach działania promieni. Próbowano również rozważać otrzymane wyniki z punktu widzenia teorii kwantów o nieciągłej emisji światła.

Wkrótce też zaczęto badać układ atomów ciała odkształconego plastycznie, jednak nie otrzymano dodatnich wyników. Dopiero Czochralskiemu i Polanyi'emu udało się to przed dwoma laty.

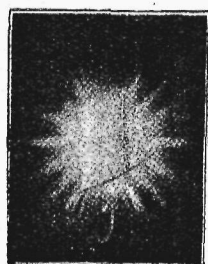


Rys. 1.

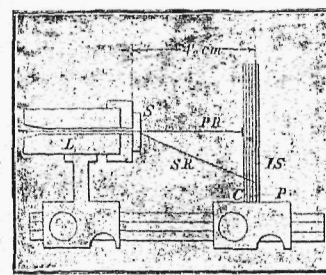


Rys. 2.

Rysunek 1 pokazuje röntgenogram Laue'go otrzymany z kryształu soli. Na rys. 2 i 3 widzimy zdjęcia dokonane z tego samego kryształu przy małym oraz przy dużym wy-

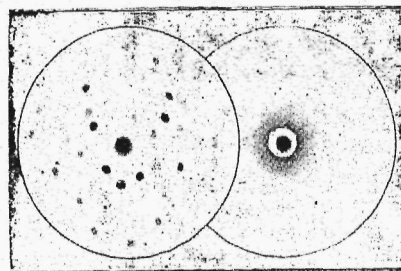


Rys. 3.



Rys. 4.

gięciu. Łatwo na nich zauważyć, iż regularny układ punktów rys. 1 zmienia się na nieregularny, zaś na rys. 3 przybiera postać gwiazdy. Fotografie Czochralskiego z Laboratorium Metalograficznego w Metallbank und Metallurgische Gesell-



Rys. 5.

Rys. 6.

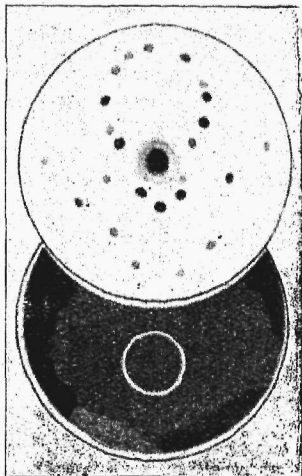
schaft w Frankfurcie pozwalają zauważyć, jak stopniowo zachodzą te przesunięcia. Układ doświadczenia pokazuje rys. 4.

Pęk promieni z rurki Röntgena przechodzi przez otwór o średnicy 2 mm w bryle ołowianej *L* oraz w pokrywie, i pada na próbkę *S*. Promienie pierwotne *PR*, wywołujące środkową ciemną plamę, i promienie wtórne *SR*, które wywołują-

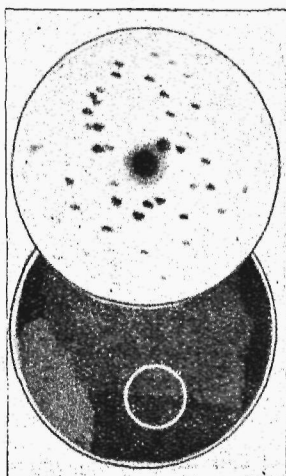
¹⁾ Nadmieniamy, że p. J. Czochralski, którego doniosłe prace są już częściowo znane w Polsce, obiecał udzielenie *Przeglądowi Technicznemu* obszerniejszych prac oryginalnych, obrazujących całokształt jego doniosłych badań. Byłoby rzeczą niezmiernie pożądaną, aby jego najnowsza książka: „Zasady metaloznawstwa”, jaka w najbliższym czasie ukaże się po niemiecku, wydana została również w rodzimym języku autora.

układ ciemnych plamek dokoła, padają na płytę fotograficzną *P*, która mieści się w pudełku *C*, a za nim znajduje się ekran *IS*, powiększający intensywność promieniowania. Zwykła grubość próbki wynosi $0,5\text{ mm}$, odległość zaś jej od płytki światłoczułej — $4,5\text{ cm}$. Odległość ta daje się zmieniać dzięki posuwowi, jaki ma pudełko na szynie.

Rys. 7.



Rys. 9.

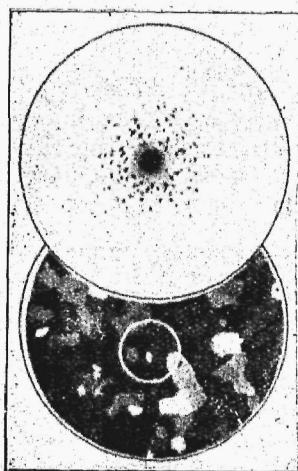


Rys. 8.

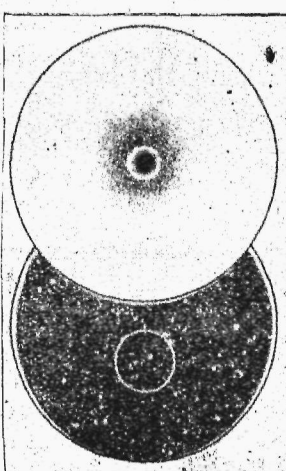
Na rys. 5 i 6 porównać możemy röntgenogramy Laue'go dla ciał krystalicznych (aluminium) i bezpostaciowych (bursztyn). Pierwszy wykazuje charakterystyczny układ punktów, gdy na drugim widzimy plamę ze zmieszanych promieni.

Rys. 10.

Rys. 11.



Rys. 13.



Rys. 12.

Rys. 14.

Dla otrzymania próbek, Czochralski stosował metodę opisaną przezeń w *Internationale Zeitschrift für Metallographie* w r. 1916. Blok aluminiowy był walcowany na zimno, a następnie poddawany rekrytalizacji przy temperaturze

600°C . Próbkę otrzymaną z tak obróbnego bloku wykazują zupełnie jednolitą drobnoziarnistą budowę. Następnie metal był poddawany obciążeniu gnącemu lub rozciągającemu i przez kilka godzin nagrzewany znów do 600° . O ile przy obciążeniu wydłużenie nie przekraczało 2%, otrzymywano próbkę, składającą się z kilku wyraźnych dużych kryształów, o odpowiedniej grubości, o powierzchniach równoległych. Jeżeli natomiast obciążenie było większe i wydłużenie dochodziło do 4%, ilość kryształów na jednostkę powierzchni wzrastała, ziarna stawały się drobniejsze i bardziej prawidłowe.

Rys. 7 i 9 przedstawiają powiększone zdjęcia płytek próbnych, składających się z jednolitego kryształu oraz polikrystalitowych. Białe kółka na rys. 8 i 10 oznaczają miejsca padania promieni. Na rys. 7 widzimy röntgenogram, który otrzymano z próbki widocznej na rys. 8, będącej jednolitym wielkim kryształem. Plamki dyfrakcyjne są okrągłe i ugrupowane w prawidłowych układach. Na rys. 9 i 10 próbka była naświetlana w ten sposób, że pole działania promieni zajmowała w połowie powierzchnia jednego krysztalitu, zaś w drugiej połowie — drugiego krysztalitu. Ilość plamek jest tu większa i niektóre z nich są wyraźnie półokrągłe. Mamy tu oczywiście dwa nakrywające się wzajemnie układy kryształów. Im ilość kryształów w polu naświetlania jest większa, tem plamki są mniejsze, mniej wyraźne i w tak wielkiej ilości, że trudno je podzielić pomiędzy kryształy, od których pochodzą.

W następnej serii doświadczeń promienie przepuszczano przez kilka pokrywających się wzajemnie kryształów. W tym celu wycięto szereg płytek z danych próbek i nakładano je jedna na drugą. Płytki przytem nakładano na siebie tak, że tworzyły one krzyż prostokątny, dalej 4 płytki układano tak, że się przecinały pod kątem 45° . Wówczas ilość punktów na zdjęciu röntgenograficznym odpowiednio się powiększała, zaś kształt tych punktów coraz bardziej się zmieniał, przybierając zamiast kółek — postać wydłużonych ziarenek. Wskazuje to superpozycję kilku plamek, właściwych poszczególnym kryształom.

Te dwie serie doświadczeń wykazują, czego możemy się spodziewać po badaniu metali za pomocą promieni Röntgena, gdy te promienie będą przechodziły przez wielką ilość kryształów, znajdujących się w polu promieni obok siebie, jak również w wielu warstwach, jedne nad drugimi. Zdjęcia naogół zmieniać się będą ze zmianą ilości kryształów w polu, to jest ze średnicą wiązki promieni, i z wielkością ziaren badanego metalu.

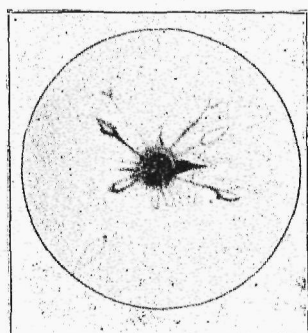
Ze zdjęciami w najogólniejszych wypadkach, obejmującymi zarówno wiele kryształów w polu naświetlania, jak też kilka ich warstw, zaznajamiamy rys. 11 — 14. Na rys. 11 mamy zdjęcie, obejmujące około 120 kryształów w 2 warstwach. Na rys. 13 zdjęcie obejmuje już około 1200 kryształów w 4 warstwach. Gdy ilość kryształów w polu promieni wzrasta do $\sim 1\,000\,000$, plamki stają się już tak liczne i tak drobne, że zdjęcia röntgenograficzne przypominają obraz, jaki daje ciało bezpostaciowe (rys. 6).

(d. n.).

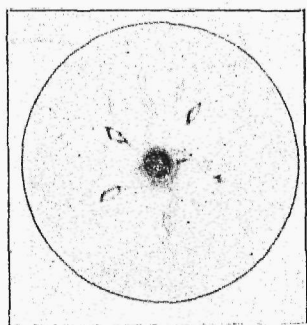
Badania odkształceń zapomocą promieni Roentgena.

(Dokończenie do str. 376, № 32).

W powyższych serjach doświadczeń próbki nie były poddawane naprężeniom. Przejdziemy teraz do następnej serji doświadczeń, których celem było zbadanie zjawisk zgniotu. Próbki były poddawane badaniom twardości metodą Brinell'a i Le Grix, przyczem posługiwano się kulką o średnicy 2 mm. Na rys. 15 widzimy röntgenogram Laue'go przy nacisku na kulkę siłą 1 kg, przyczem średnica wgłębienia wynosiła 0,3 mm. Pełne okrągłe plamki w rodzaju pokazanych na rys. 5, które otrzymano przed zgniotem, w znacznym stopniu zmieniły swój kształt i poniekąd również rozmieszczenie. Plamki mają obecnie wygląd krzywych soczewkowatych. Ze wzrostem nacisku do



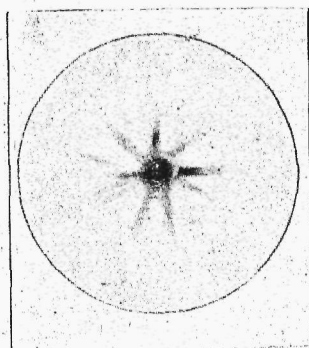
Rys. 15.



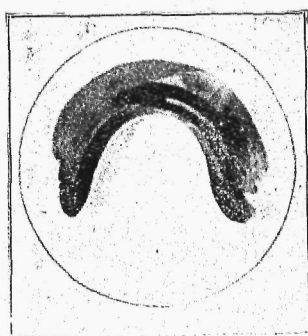
Rys. 16.

5 kg (rys. 16) soczewkowaty kształt plamek staje się coraz wyraźniejszy. Jednocześnie dalsze plamki coraz bardziej się zbliżają do środkowej ciemnej plamy. Prócz tego zjawiają się wyrostki w kierunku promieni. Na 17 mamy już ciśnienie 10 kg, przy użyciu większej kulki; wgłębienie ma średnicę 1 mm. Oddzielnych plamek już tu nie można odróżnić. Wytworzyła się gwiazda, lub jak zjawisko powyższe nazwał Czochralski, „asteryzm”. Okazało się też, że w pobliżu granicy sprężystości nieznaczne odkształcenie jest w stanie wywołać dużą zmianę w wyglądzie röntgenogramu. Naprzykład ułknięcie kryształu igłą stalową na głębokość zaledwie 0,1 mm zmieniło już kształt plamek na soczewkowaty.

Możnaby przypuścić, że naprężenia, zdolne do wywołania tak uderzających zmian, możnaby ujawnić i w inny jakiś sposób. Doświadczenie jednak wykonane z kryształem gipsu nie potwierdziło tego poglądu. Prostą kryształ gipsu zgięto ostrożnie w pałąk (rys. 18), przyczem nie powstały żadne gęknienia i kryształ pozostał przezroczysty. Lecz radjogramy Laue'go wykazały głębokie zmiany. Na rys. 19 mamy radjogram otrzymany przed zgięciem, zaś na rys. 20 — po zgięciu kryształu. Na tym ostatnim rysunku oddzielne plamki po-



Rys. 17.



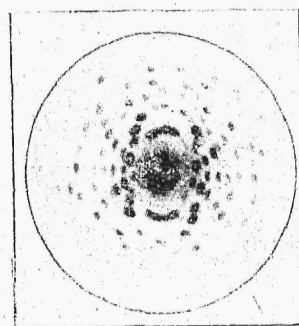
Rys. 18.

łączyły się w kształty eliptyczne i znikł ich poprzedni układ na kołach i promieniach. Można byłoby wobec tego przypuszczać, że po zgięciu kryształu w pałąk, jego budowa przyjmie postać łuku o cegiełkach promieniowo położonych. Badania mikroskopowe jednak nie wykazały najmniejszego śladu szczelin pomiędzy domniemanymi cegiełkami. Byłyby zaś one widoczne, gdyby miały szerokość chociażby 0,001 mm. Również nie zauważono wcale zmniejszenia wytrzymałości

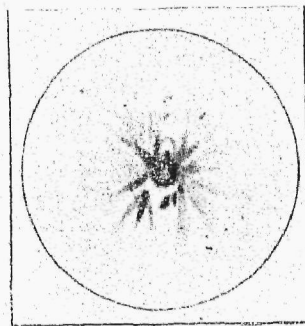
materiału. Czochralski wnioskuje stąd, że zmiana kształtu musiała wywołać przegrupowanie atomów.

Następnie przystąpił on do badań kryształu aluminium, który był najpierw rozciągany na maszynie rozrywającej i po rozerwaniu — walcowany. Okrągłe plamki zmieniały nieco położenie i wydłużały się. Pojawiający się układ gwiazdasty (asteryzm) wykazywał zgrubienie i mniejszą wyrazistość promieni gwiazdy, w miarę wzrostu obciążenia.

W następnej serji analogicznych doświadczeń (rys. 21 do 26) kryształy glinu poddawane były jedynie stopniowemu walcowaniu na najcieńsze osiągalne blaszki. Rys. 21 przedstawia obraz zdjęty z próbki, której pole przekroju zmniejszyło się podczas walcowania tylko o 5%. Układ plamek na ogół niewiele się zmienił, jednak niektóre z nich są wydłużone, nadto dają się już zauważyć słabo zarysowane promienie. Po zmniejszeniu pola przekroju do połowy poprzedniej wartości, otrzymano obraz uwidoczniony na rys. 22, gdzie jeszcze wyraźniej występują zmiany zauważone na rys. poprzednim. Próbkę, której röntgenogram przedstawia rys. 23, walcowano dodatkowo w innym kierunku, różniącym się od poprzedniego o 90°, przyczem osiągnięto dodatkowe zmniejszenie przekroju o 15%. Jak widzimy, powstały tu nowe promienie, tworzące kąt ok. 30° z kierunkiem poprzedniego walcowania. Gdy walcowano próbkę dalej w tym samym kierunku aż do możliwie najmniejszego przekroju (zmniejszenie pola jeszcze o 40%), wówczas tylko 3 promienie stały się widocznymi (rys. 24), cały zaś ich układ jest obrocony w kierunku przeciwnym do wskazówki zegara. Promienie gwiazdy, które do tychczas zajmowały położenie niezmiennie, wzięły udział w tym ruchu a zarazem skróciły się.



Rys. 19.

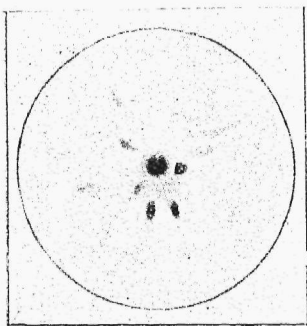


Rys. 20.

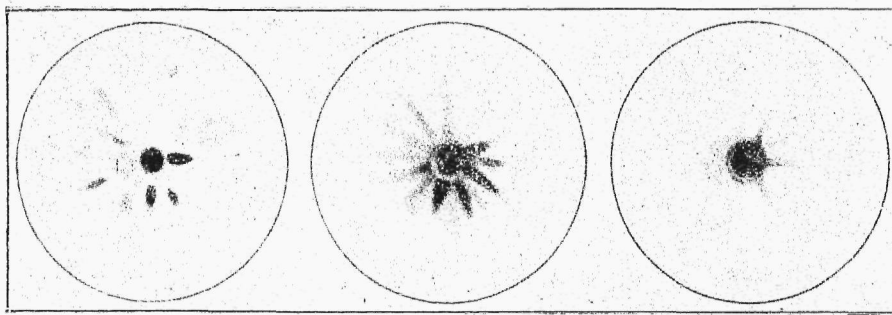
Należy zauważyć, iż promienie gwiazdy zjawiają się przeważnie w pewnych określonych ćwiartkach koła. Nie jest to zresztą czemś niespodziewanem. Całkowita symetria w 4 ćwiartkach mogłaby być uzyskiwana jedynie w doskonałych sześciennych kryształach, naświetlanych normalnie do powierzchni. Kryształy glinu są wprawdzie sześciennie, lecz ich „orientacja” w stosunku do wiązki promieni Röntgena była nieznana. Dlatego szczególnie wyraźnie zaznaczył się tu wpływ kierunku walcowania. Przykładem symetrycznego układu gwiazdy może służyć rys. 26, przedstawiający röntgenogram próbki zwalcowanej do 70% przekroju pierwotnego. Prawie symetryczna gwiazda posiada jednak niejednakowo wyraziste promienie. Röntgenogram tej samej próbki przed odkształceniem widzimy na rys. 25.

Wywody powyższe możemy streścić w sposób następujący: gdy próbki poddaje się naprężeniom, plamki na radjogramach odkształcają się i przesuwają w kierunkach stycznym i promieniowym. W miarę wzrostu odkształcenia, zamiast plamek powstają linie w kierunkach promieni, niektóre z nich stają się coraz bardziej wyraziste, zjawiają się nowe promienie, najbardziej zaś wyraźne linie obracają się dokoła środka jądra radjogramu, ustawiając się równolegle lub prostopadle do kierunku sił obciążających. Ogólna postać układu na radjogramie zależy od orientacji kryształu względem kierunku promieni Röntgena i względem kierunku sił zewnętrznych. Odwrócenie kierunku działania sił tych wywołuje odwrotny kierunek obrotu linii promienistych. W koń-

cu, przy coraz większych odkształceniach, spowodowanych siłami zewnętrznymi, promieniowy układ linii zanika i nadmiernie odkształcone ciało zaczyna się upodabniać do gromady bardzo drobnych kryształków lub do ciała bezpostaciowego. Rekrytalizacja przywraca poprzedni układ oddzielnych plam interferencyjnych. Można przypuszczać, że znaczniejsze powiększenie pozwoliłoby rozróżnić układy plamek nawet w radjogramach ciał stałych bezpostaciowych. Zasadniczo może nie być różnicy między ciałami krystalicznymi i bezpostaciowymi, jak to zauważyli Debye i Scherrer przy badaniu zapomocą promieni Röntgena różnych postaci węgla¹⁾. Układ atomów w ciałach stałych zawsze ma według nich ulegać pewnym mniej lub więcej wyraźnym prawom.



Rys. 21.

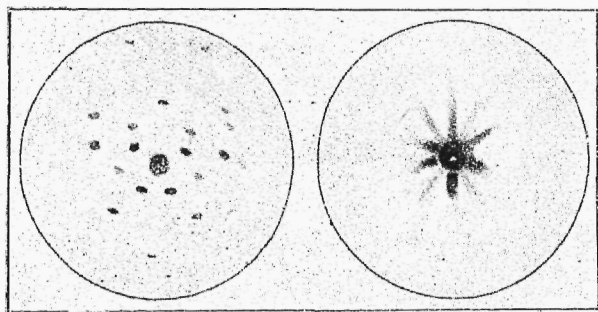


Rys. 22.

Rys. 23

Rys. 24.

Czochralski zwraca szczególną uwagę na uderzającą różnicę między dwoma rodzajami zjawisk. Do jednego należą zjawiska, zachodzące w pojedynczych kryształach i w ciałach wielokryształowych oraz metalach o coraz drobniejszych ziarnach (rys. 7 — 14); do drugiego (rys. 15 — 17)—zjawiska, zachodzące przy odkształceniach metali. W miarę wzrostu liczby kryształów w polu naświetlenia, wzrasta też ilość plamek i układ radjogramu staje się złożonym. Gdy natomiast metal jest odkształcony, ilość plamek pozostaje bez zmiany, lecz ich postać i wzajemne położenie ulegają zmianom. Zjawiska te wskazują, że naprężenia nie wywołują rozpadania się poszczególnych kryształów na mniejsze części.



Rys. 25.

Rys. 26.

Zachodzić zaś musi stopniowa zmiana w samym układzie atomów przez zwiększenie lub zmniejszenie odstępów międzyatomowych. Pod tym względem pogląd Czochralskiego różni się od innych badaczy, którzy wychodząc przeważnie z innych metod doświadczalnych sądzą, że drobne zmiany w układach plamek, otrzymane podczas badania odkształceń, należy przypisać niewielkim uszkodzeniom kryształów i wadliwości przyrządów.

Na podstawie tych i innych swych badań, Czochralski sądzi, że „wzmocnienia“, jakie zimna obróbka daje w pewnych warunkach metalom, nie należy tłumaczyć ani tworzeniem się warstwy bezpostaciowej, ani też „hypotezą translacji“. Wzmocnienie to powstaje wskutek przesunięć, zachodzących w budowie siatki krystalicznej. Jej przesunięcia odbywają się według linii poślizgu. Wszystkie ślady linii i powierzchni poślizgowych (jak wykazały dalsze doniosłe badania Czochral-

skiego), w miarę trwania walcowania zanikają coraz bardziej w aluminium, miedzi, cynku, żelazie i in. metalach. Wobec tego poślizg nie może być uważany za cechę charakterystyczną zasadniczej fazy walcowania.

Zarazem zauważono, że w okresie plastycznego odkształcania zanikają wszelkie cechy budowy krystalicznej, które zwykle wykazuje wytrawianie. Można było sądzić, że głębsze wytrawianie może wykazać to, czego zwykle wytrawianie nie jest w stanie wykryć; możeby się udało naprz., wykryć to ewent. zapomocą metody głębokiego wytrawiania A. Fry'a²⁾, która niedawno dała bardzo pożyteczne wyniki przy badaniu tożsamości prętów ze stali specjalnej, skradzionych z zakładów Kruppa. Wszystkie znaki fabryczne zostały przez złodziei-

zeszlifowane, lecz wytrawienie metodą Fry'a wykazało je z powrotem.

Zakłócenia ukazujące się w wykresach Laue'go przy małym obciążeniu, i wzrost tych zakłóceń przy działaniu większych sił zewnętrznych zdają się wskazywać na to, że obciążenia odkształcają elementy siatki, zmieniając w niej układ atomów. A więc nie zachodzą tu tylko wzajemne poślizgi dużych kryształów. Większe kryształy nie rozpadają się na jednostki mniejsze, któreby się układały ponownie tak, by stać się opór dalszym działaniom sił.

Nadmienić należy, że niektóre najnowsze doświadczenia zdają się potwierdzać wywody Czochralskiego, chociaż sami wykonawcy tych doświadczeń tłumaczą otrzymane wyniki w inny sposób. W ub. roku A. Ono, w uniwersytecie Kyushu w Japonii badał metodą Laue'go drobnoziarnistą miedź, wyciągniętą na drut lub walcowaną, przyczem próbki były ustawiane tak, że oś drutu wypadła prostopadle do kierunku promieni Röntgena. Układ plamek próbki nienaruszonej przypomina rys. 1. Próbkę rozciągniętego metalu dała ma sywną gwiazdkę, w której średnica, równoległa do kierunku ciągnięcia, była mocno zaznaczona, zaś kąty promieni gwiazdki wykazały zgodność z obliczeniami Ono, który zakładał, że główne płaszczyzny kryształu będą dążyły do ustawienia się pod kątem prostym do kierunku sił zewnętrznych. Podobnie jak Czochralski, otrzymał Ono bardziej charakterystyczne wykresy z próbek walcowanych, jak z ciągniętych. Wywody Ono są zgodne z poglądami innych uczonych (Körber³⁾, Polanyi i in.), którzy stosowali zarówno metodę Laue'go jak też metodę Debye'go.

Poglądy przeciwników Czochralskiego sprowadzają się do tego, że wytrzymałość na ścinanie może tylko wtedy osiągnąć maximum, gdy powierzchnie poślizgowe ułożą się symetrycznie względem kierunku działania sił zewnętrznych.

Tak się przedstawiają niektóre wyniki tych interesujących prac nowoczesnych. Zapomocą promieni Röntgena dochodzimy do najgłębszych tajników budowy materji, dotyczących wyjaśnienia istoty odkształceń, zachodzących w rozmaitych ciałach, pod wpływem różnych sił zewnętrznych.

Niewątpliwie dalsze prace będą coraz więcej oświeślały te doniosłe zagadnienia i zastosowanie tych badań czysto naukowych doprowadzi do szeregu ważnych dla inżynierji praktycznej wniosków.

¹⁾ *Engineering*, 1917, str. 954.

²⁾ *Engineering*, 1921, str. 809.

³⁾ *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1923, lipiec.