

PRZEGLĄD TECHNICZNY

TYGODNIK POŚWIĘCONY SPRAWOM TECHNIKI I PRZEMYSŁU.

TREŚĆ: H. Mierzejewski. Nowe poglądy na plastyczność metali. — S. Niesulowski. W obronie młynka hydrometrycznego. — W obronie poprawności badań hydrotechnicznych. — Wiadomości techniczne. — Bibliografia. — Kronika.

Z 8-ma rysunkami w tekście.

NOWE POGLĄDY NA PLASTYCZNOŚĆ METALI.

Przez prof. H. Mierzejewskiego (Warszawa).

Jak wiadomo, pierwsze poważniejsze zwrócenie uwagi na zjawiska plastyczności metali datuje się od czasu, gdy Tresca, zachęcony postępani techniki wyciskania na zimno metali, podjął swe doświadczenia nad „ciekiem ciał stałych”¹⁾. Jakkolwiek poglądy Tresca były pod wielu względami prymitywnie technologiczne, należy jego doświadczenia nad wyciekami ołowiu przez małe otwory, oraz nad zgniataniem, przebijaniem i wyciskaniem metali uznać z punktu widzenia historycznego za klasyczne, a to ze względu na swą różnorodność, sumienność w odtwarzaniu przebiegu zjawisk i usilowanie szerszych wnioskowań.

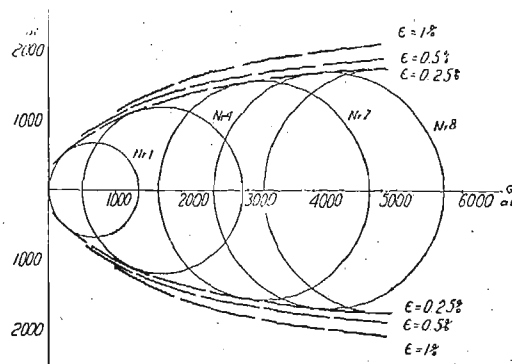
Znaczenie doświadczeń Tresca zmalałoby znacznie, gdyby St. Venant nie dostosował do nich, co prawda nieco sztucznie, swych równań, dotyczących równowagi ciał plastycznych²⁾. Zestawienie doświadczeń Tresca z matematyczną teorią plastyczności, zapoczątkowaną przez St. Venant’a i uzupełnioną wkrótce przez M. Lévy, dało pozór zgodności wyników doświadczalnych z teorią. Z biegiem czasu ujawniła się jednak pewna bezpłodność twórcza samej teorii, zaś gromadzone stale badania w dziedzinach pokrewnych wykazały jednostronność poglądów St. Venant’a.

Nowe światło na zagadnienie plastyczności metali rzuciły, przeprowadzone głównie we Francji w końcu ubiegłego stulecia, badania nad kruchością żelaza i stali³⁾. Ustaliły one, że obok metali „regularnie” kruchych, jak np. bizmut i antymon, pękających bez widocznego wydłużenia i przy małym wydatkowaniu pracy mechanicznej, oraz obok ciał regularnie plastycznych, jak miedź, pękających w wyniku znacznych odkształceń trwałych, istnieją metale o kruchości przejściowej. Owa kruchość przejściowa okazuje się zależną, przytem nie tylko od natury samego metalu, jego budowy, jednorodności i t. p., lecz również i od rodzaju obciążenia, kształtu przedmiotu, temperatury i t. p.

Badania powyższe zapoczątkowały nowy pogląd na fizyczne podstawy wytrzymałości metali. Przedewszystkiem spożytkowano odkrycia metalograficzne. Poza uwzględnieniem wpływu obróbki termicznej, mechanicznych własności poszczególnych składników metalograficznych, zwrócono uwagę na kilka zjawisk, które wywarły doniosły wpływ na teorię późniejszą, a były nieznane poprzednio. A więc Le Chatelier ustalił po raz pierwszy warunki pęknięcia kruchego, jako międzykomórkowego (intercellulaire, oraz plastycznego, jako wewnątrzkomórkowego (intracellulaire). Przej-

ściową kruchość żelaza i stali Le Chatelier uzasadniał tą samą prawie wytrzymałością ziarn krystalicznych, co i pogranicza pomiędzy ziarnami. Nie mniejszą wartość posiadały próby Fremont’a i Osmond’a porównania na drodze doświadczalnej układu naprężeń sprężystych z układem naprężeń plastycznych w próbkach wytrzymałościowych, oraz uwydatnienie przez nich roli poślizgów krystalicznych, zaobserwowanych przez Ewing’a i Rosenhain’a⁴⁾. Podkreślić tu należy rozważania Charpy nad lokalizacją odkształceń plastycznych w próbkach wytrzymałościowych⁵⁾.

Plastyczność jest tak zasadniczą własnością mechaniczną metali, że rozważając skojarzone z nią zjawiska, musimy traktować niekiedy całość zagadnień, dotyczących fizycznych podstaw wytrzymałości. Jedno z najważniejszych pytań, jakie się przy tem nasuwa, polega na zdaniu sobie sprawy z warunków, przy których następuje pęknięcie. Teorie wytrzymałościowe, rozwijające się na podłożu nagromadzonego w ostatnich czasach materiału, coraz wszechstronniej traktują powyższe zagadnienie. Jednym z kroków w tym kierunku były prace Mohra nad ogólnym stanem naprężeń⁶⁾.



Rys. 1.

Zasługą Mohra było zobrazowanie stanu naprężeń za pomocą oryginalnej i przejrzystej metody wykresowej. Hypoteza Mohra polega na tem, że każdemu materiałowi odpowiada funkcja charakterystyczna $\tau_{max} = f(\sigma)$, przyczem τ_{max} i σ są to naprężenia w płaszczyźnie, przechodzącej przez średnią oś elipsoidy naprężeń. Dzięki temu ostatniemu założeniu zagadnienie sprowadza się do rozważania płaskiego układu naprężeń. Krzywa charakterystyczna $\tau_{max} = f(\sigma)$, jako obwiednia okręgów, odpowiadających naprężeniom krańcowym, przedstawia przejrzysto krytyczne wartości naprężeń normalnych i ścinających (rys. 1).

⁴⁾ J. A. Ewing and W. Rosenhain. Phil. Trans. 193. (1900) str. 353 i 195 (1901), str. 279.

⁵⁾ Rola Francji w tym okresie będzie należycie oceniona, gdy dodamy, że w tym samym czasie wykonał swe piękne badania L. Hartmann, nad występowaniem bruzdek poślizgowych (por.: Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts. Paryż 1896). Doświadczenia technologiczne, zapoczątkowane przez Tresca, rozwinął z niesłychanym nakładem pracy Codron.

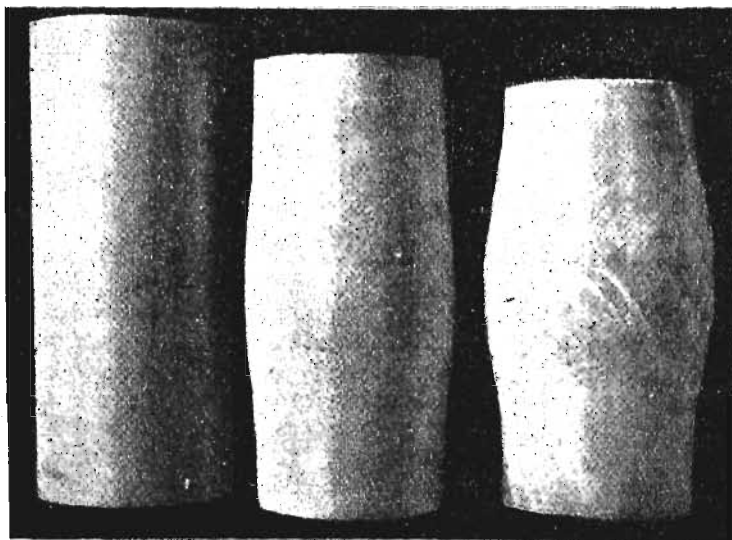
⁶⁾ O. Mohr. Abhandlungen auf dem Gebiete der technischen Mechanik. Drugie wydanie 1914, str. 192—235. Praca ta traktuje przejrzysto różne hipotezy, dotyczące pęknięcia. Również Timoszenko-Huber. Wytrzymałość materiałów. Lwów 1922, str. 63 i nast. W dopiskach prof. Hubera do przekładu dzieła Timoszenko zasługuje na specjalną uwagę zwalczanie głęboko zakorzenionej w umysłach wielu inżynierów wiary w prostotę zjawisk wytrzymałościowych. Śluszny ten pogląd będziemy starali się uzasadnić w dalszej części niniejszego referatu.

¹⁾ H. Tresca. Mémoire sur l'écoulement des corps solides (Extrait du tome XVIII et XX des mémoires présentées par divers savants à l'Institut imperial de France. Paryż 1868—1871. Pierwsze próby teorii wytrzymałościowych z wieku XVII i XVIII-go zakreślały sobie szerokie cele ustalenia teorii ciał niedoskonale sprężystych i plastycznych. Opierały się one jednak o przesłanki metafizyczne i kategorie szkoły perypatetycznej, odrzucającej doświadczenie, jako zasadniczy czynnik postępu naukowego i dlatego badania Tresca należy uznać za pierwszą racjonalną próbę w tym kierunku.

²⁾ Marcel Brillouin. Théorie de la plasticité et de la fragilité des solides isotropes. Annales de Physique. XIII, 1920, str. 217 oraz tamże: La théorie de Tresca — St. Venant. XIV, 1920, stronica 75—113.

³⁾ Contribution à l'étude de la fragilité dans les fers et les aciers (Mémoires originaux et réimpressions). Paryż 1904. Zbiorowa ta publikacja zawiera poglądy i wyniki badań Le Chatelier'a, Considère'a, Fremont'a, Osmond'a, Charpy'ego i innych. Jakkolwiek idea przewodnią tych badań było przedewszystkiem ustalenie warunków próby na uderzenie, niemniej jednak zakres prac objął szeroko zjawiska wytrzymałościowe i metalograficzne, ilustrując dobrze ówczesny stan nauki.

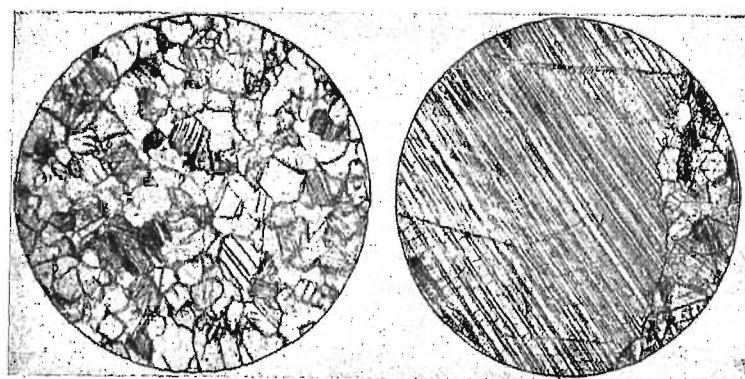
Jakkolwiek założenia hipotezy Mohra są nieco sztuczne i postulat, że poślizgi następują zawsze w płaszczyźnie, przechodzącej przez kierunek średniego naprężenia głównego, musi budzić poważne wątpliwości, niemniej jednak dla pewnych ciał, a zwłaszcza dla metali plastycznych hipoteza Mohra dość dobrze odpowiada rzeczywistości. Należy dodać,



Rys. 2.

że ogólniejszy charakter posiada hipoteza Hubera⁷⁾, polegająca na tym, że miarą wyężenia materiału jest suma obu części właściwej pracy odkształcenia, jakiej wymaga zmiana postaci i zwiększenie objętości ciała. Można ją uważać za precyzyjniejszą od hipotezy Mohra, który nie podaje kształtu funkcji $\tau_{max} = f(\sigma)$, pozostawiając tym sposobem pewną dowolność w interpretacji wzorów.

Hipotezie Mohra nadały rozgłos przeprowadzone w roku 1911 przez Th. v. Kármán'a doświadczenia nad zgniataniem słupków marmurowych przy zmieniającym się w szerokich granicach ciśnieniu hydrostatycznym, działającym na boki próbki. Doświadczenia te wykazały, że przy pewnym ustosunkowaniu ciśnienia poosiowego i bocznego marmur, będący typowym ciałem kruchym, daje się odkształcać plastycznie.⁸⁾ Rys. 2 przedstawia z lewej strony słupki marmu



Rys. 3.

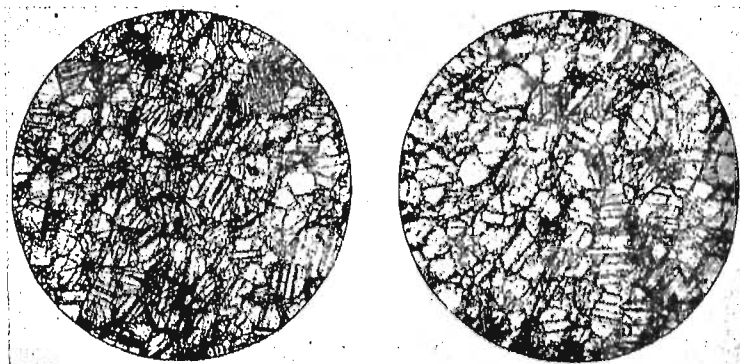
Marmur, po wydłużeniu 9%-em wskutek wywarcia ciśnienia wszechstronnego 2500 atm., powiększenie 40-krotne. Płytki bliźniacze dużego krystalitu po odkształceniu plastycznym, powiększenie 40-krotne.

rowy przed zgniataniem, w środku tę samą próbkę przy ciśnieniu hydrostatycznym 685 atm., zaś z prawej strony tą próbkę po zmniejszeniu ciśnienia bocznego do 500 atm. Rys. 3 i 4 wykazują dobitnie, że rodzaj odkształceń jest inny zgoła przy ciśnieniu zwykłym, inny zaś przy wszechstronnym.

⁷⁾ M. T. Huber. O podstawach teorii wytrzymałości (Prace Mat. Fiz. 1904), oraz: Właściwa praca odkształcenia jako miara wyężenia materiału (Czasopismo Techniczne 1904). Na hipotezę Hubera zwrócił baczną uwagę A. i L. Föppl: Drang und Zwang. Monachjum 1920. Należy tu podkreślić, że pierwsza próba uzasadnienia tej hipotezy w „Pracach Matem-Fizycznych” oparta jest na pojęciu gęstości atomowej ciała atomowo-izotropowego przed i po odkształceniu, co wiąże się bezpośrednio z najnowszymi poglądami na powyższe zagadnienie, jak o tem będziemy mówili poniżej.

⁸⁾ Th. V. Kármán: Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. Z. V. D. I. № 42, rok 1911, str. 1749–1757.

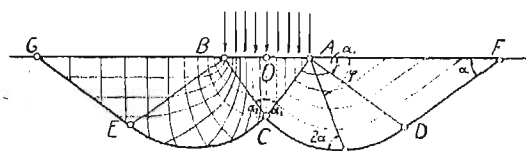
Jakkolwiek pewne wnioski Kármán'a nie były zasadniczo nowe⁹⁾, to jednak precyzyjność pomiarów, a przede wszystkim szerokie ujęcie całego zagadnienia, dały doświadczeniom Kármán'a zasłużony rozgłos. Dla dobra sprawy było czynnikiem niemniej wagi okoliczność, że Kármán wykonywał swe doświadczenia w Instytucie Mechaniki Stosowanej prof. Prandtla w Getyndze. Tym sposobem odkształcenia plastyczne, będące typowym zagadnieniem technicznym, obudziły szersze zainteresowanie w tym poważnym ośrodku niemieckiej myśli teoretycznej. To też getyngenski etap rozwoju zagadnienia plastyczności metali zaznaczył się kilkoma ważnymi posunięciami naprzód. Zapoczątkował je w r. 1908 Prandtl, wprowadzając odróżnienie dwóch odmian pęknięcia: pęknięcie wskutek oderwania (Trennungsbruch) i wskutek przesunięcia (Verschiebungsbruch). W pracach Kármána¹⁰⁾ daje się zauważyć coraz głębsze uwzględnienie podłoża fizycznego zachodzących zjawisk. Rozpatruje on i oświeśla krytycznie różne teorie wytrzymałościowe, uwzględnia wszechstronnie różne rodzaje obciążeń i analizuje zjawiska z punktu widzenia tak inżyniera jak i fizyka, podkreśla na każdym kroku znaczenie struktury krystalicznej przy objaśnianiu zjawisk plastyczności metali. Jeśli nawet powtarza on rzeczy znane poszczególnym specjalistom, to nie można odmówić jego pracom piętna świeżości i oryginalności ze względu na zawartą w nich syntezę poglądów i stanowisk.



Rys. 4.

Marmur po zwykłej próbie ciśnienia, powiększenie 40-krotne.

W r. 1920 podejmuje badania nad twardością ciał plastycznych Prandtl¹¹⁾, rozwijając teorię Tresca St. Venant'a. Założenia Prandtla są jednak nowe. Rozważając mianowicie obciążenie półpłaszczyzny nieograniczonej (rys. 5)



Rys. 5.

zapomocą płaskiego stempla nieskończonej długości, a więc sprowadzając zagadnienie do płaskiego układu odkształceń, wprowadza Prandtl cały szereg hipotez upraszczających. Pomija więc utwardzanie (écrouissage) metalu wskutek odkształceń plastycznych. Półpłaszczyznę odkształconą dzieli Prandtl na kilka odrębnych części, przyjmując, że klin ABC,

⁹⁾ F. D. Adams and J. T. Nicolson: Experimental Investigation of Flow of Marble. Phil. Trans. Roy. Soc. A. 195, str. 363 (1901). Zasadnicze wyniki tej pracy doświadczalnej podaje i omawia cytowany przez nas następnie Bealby w swym dziele: Aggregation and Flow of Solids. Londyn 1921, str. 191. O plastyczności marmuru pisał również i Kick: Vorlesungen über mechanische Technologie. Lipsk i Wiedeń. 2-gie wydanie 1908, str. 3.

¹⁰⁾ Th. V. Kármán. Physikalische Grundlagen der Festigkeitslehre. Enzykl. d. Math. Wiss. Tom IV. Art. 31, str. 695–770.

¹¹⁾ L. Prandtl. Ueber die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. Z. für angew. Math. und Mechanik № 1. Luty 1921. Uzupełnieniem tej pracy są doświadczenia Nádaí'a, opisane w tym samym zeszycie: Versuche über die plastischen Formänderungen von keilförmigen Körpern aus Flusseisen, str. 21–28.

znajdujący się bezpośrednio pod stemplem spycha na bok i ku górze „dziedziny odkształceń plastycznych“ *ACD* i *BCE*. Na lewej stronie rys. 5 widzimy zwykły układ naprężeń, zaś na prawej wyidealizowane przez Prandtl'a „linje prądu“ ruchu plastycznego w myśl założeń St. Venant'a. Prandtl otrzymuje tym sposobem prosty układ równań różniczkowych i posilkując się zrecznie wykresem obwiedniowym Mohr'a rozwiązuje zagadnienie równowagi w pierwszym momencie zagłębiania się stempla w materiał. Uogólnia on następnie otrzymane wyniki dla pokrewnych płaskich układów odkształceń.

Zgruba ciosana, postulatowa metoda Prándtla, oparta na pomysły St. Venant'a wyodrębnienia dziedziny plastycznej od sprężystej i wprowadzenia pojęcia ruchu plastycznego, dzięki umiejętnemu wyzyskaniu hipotezy Mohra, jest ogólniejsza, pomimo pewnych pozorów, od początkowej teorii St. Venant'a. Metodzie Prandtl'a należy rokować powodzenie w zastosowaniu do teorii skrawania metali, co będzie jednak

możliwym z chwilą uzyskania bogatszego materiału doświadczalnego, umożliwiającego wyznaczenie postulatowe dziedzin plastycznych i dobranie odpowiednich współrzędnych krzywoliniowych.

Na innym stanowisku, posiadającym jednak niewątpliwie wpływ na ustalenie się poglądów na plastyczność metali stanął Tammann, badając metalograficzną stronę zjawisk plastyczności. Prace Tammann'a¹²⁾ objęły szeroki zakres zagadnień: rolę poslizgów krystalicznych i tworzenia się bliźniaków¹³⁾ pod wpływem działań mechanicznych, termodynamikę odkształceń plastycznych, zapoczątkowaną przez Spring'a, rekrytalizację po zgnioście, zmianę własności elektrycznych metali wskutek obróbki na zimno i t. p.

Bodaj największą zasługą Getyngi w dziedzinie wyjaśnienia zjawisk plastyczności będą jednak raczej nie omawiane prace i przyczynki naukowe, ile przygotowanie gruntu do bardziej zasadniczych rozwiązań.

(d. n.)

W OBRONIE MŁYNKA HYDROMETRYCZNEGO.

Napisał S. Niesułowski, inż.

W № 11 — 13 Przeglądu Technicznego podany został artykuł prof. M. Broszko pod tytułem: „Wpływ niedokładności wskazań młynków hydrometrycznych na wyniki pomiarów przepływu wody w rzekach“. Autor artykułu przychodzi ostrożnie do wniosku, że „młynek hydrometryczny... jest instrumentem niedokładnym i bardzo niepewnym“, że „sposób wyznaczania krzywych konsumpcyjnych, opierający się na pomiarach młynkowych, musi prowadzić do wyników *zazwyczaj* bardzo niedokładnych i (co ważniejsze) obarczonych *zawsze* bardzo wysokim stopniem niepewności“.

Przyczynę niedokładności pomiaru młynków autor artykułu widzi w tem, że stosowane dotychczas młynki są przyrządami całkującymi, nie zaś wskazującymi chwilową wielkość zmiennych prędkości lokalnych.

Wywody swoje autor opiera na znanych mu z własnego doświadczenia danych, lub spostrzeżeniach innych hydrotechników, które rzekomo wykazują błędy pomiarów hydrometrycznych przepływu wody, dochodzące do kilkudziesięciu %. Konkretnych dat cyfrowych obserwacji i bliższych szczegółów co do sposobu i warunków wykonania pomiarów autor nie podaje, wskutek tego czytelnik otrzymuje wrażenie, że na wyniki świadczące o takiej niedokładności pomiarów mogły wpłynąć i jakieś specjalne okoliczności dokonywania pomiarów, na które autor nie zwrócił uwagi.

Przypuszczać należy, że mylne pomiary, o których mowa w artykule, dokonane były wyłącznie w kanałach, doprowadzających wodę do turbin, w warunkach szczególnie dla dokładności pomiarów niekorzystnych, jednak, artykuł prof. Broszko zdradza tendencję rozpowszechnienia zredagowanych ogólnikowo i bez zastrzeżeń wniosków na wszelkie pomiary zapomocą młynków hydrometrycznych. Zachodzi więc obawa, że inżynierowie budownictwa wodnego „powszechnie przeceniający“ (zdaniem prof. Broszko) dotychczas dokładność pomiarów młynkowych, ulegną sugestji artykułu i zaniechają pomiarów i w tych wypadkach, gdzie nie należy się obawiać otrzymania błędnych wyników. Jako na główne źródła błędów przy pomiarach prędkości młynkiem hydrometrycznym, prof. Broszko wskazuje na: zmienność wartości chwilowych prędkości lokalnych na skutek nieustalonego zazwyczaj ruchu wody w rzekach lub kanałach, i na odchylenia kierunku prędkości od linii prostopadłej do przekroju mierniczego. Błędy, pochodzące z tych źródeł, przypisuje prof. Broszko młynkowi niesprawiedliwie, gdyż zależą one nie tyle od konstrukcji i właściwości młynka, ile od sposobu jego zastosowania i użycia. Wpływ zmienności chwilowych prędkości będzie omawiany szczegółowo w dalszym ciągu, wpływ zaś odchylenia kierunku prądu, na wyniki pomiarów, niewątpliwie dość znaczny w poszczególnych wypadkach, nie wydaje się jednak zupełnie nieuniknionym przy ogólnym wyborze przekroju mierniczego pod warunkiem, aby odpowiedni odcinek rzeki posiadał na dość długiej przestrzeni niezmienną przekroju, ewentualnie równoległość kierunków prądu. Być może, że w kanałach, dopro-

wadzących wodę do turbin, ten warunek w poszczególnych wypadkach trudny jest do osiągnięcia, lecz na rzekach o korytach naturalnych zazwyczaj jest to możliwe. W każdym razie, gdyby nawet kąt odchylenia prądów od prostopadłej do przekroju wynosił przeciętnie jakie 15°, co jest już bardzo dużo, to błąd w określeniu przepływu dla młynka samonasta-

wialnego mógłby dochodzić najwyżej do $\frac{1 - \cos 15^\circ}{\cos 15^\circ} = 3,5\%$,

przy użyciu zaś młynka sztywnie umocowanego, istnienie błędów wskutek odchylenia lub zmienności kierunku prądu wogóle nie jest udowodnione, wątpliwem zaś jest, aby te błędy mogły być wyczuwane w granicach dokładności obliczeń sprawności turbin.

Powracając do zagadnienia o wpływie na dokładność pomiarów zmienności prędkości chwilowych, czyli tak zwanej pulsacji, któremu prof. Broszko udziela stosunkowo mniej uwagi, zaznaczyć muszę, że zjawisko pulsacji budziło dość żywe zainteresowanie w kołach hydrotechników rosyjskich: w 1909 r. inżynier Żukowski, na podstawie doświadczeń hydrometrycznych na rz. Wołdze, wygłosił zajmujący i obszerny referat na zjeździe działaczy na polu komunikacji wodnych (referat ten niestety nie był wydrukowany) o metodach opracowania i obliczeń wyników pomiarów hydrometrycznych, w którym podał również dane z obserwacji, dotyczące pulsacji, prędkości i wpływu jej na dokładność pomiarów.

W sprawozdaniach z robót hydrometrycznych, dokonanych przez inżyniera Sokołowa w 1909 r. na rzece Zeji, przez inżyniera Mojsiejenkę w 1910 — 1911 r. na rzekach, wchodzących w skład Kamsko-Tobolskiej drogi wodnej i przez inżyniera Bliźniaka w 1911 — 1912 r. na rz. Jenisieju, znajdujemy również wyniki badań nad wpływem pulsacji na dokładność pomiarów młynkiem hydrometrycznym¹⁾.

Autor niniejszego artykułu, kierując robotami hydrometrycznymi na rz. Szyla w 1904 — 1906 r., również brał pod uwagę możliwość błędów przy pomiarach, uwarunkowanych pulsacją prędkości i starał się te błędy zmniejszyć, stosując pewną modyfikację powszechnie przyjętego sposobu określenia przeciętnej prędkości na pionowej pomiaru.

Inżynier Żukowski dokonywał na Wołdze pomiarów hydrometrycznych zapomocą młynka, skonstruowanego przez znanego węgierskiego hydrotechnika Hajosa'a. Młynek ten posiadał przyrządy do wykresnego notowania jednocześnie: liczby obrotów młynka i czasu, co pozwalało otrzymywać wartości prędkości, przeciętne w ciągu każdego pięciu sekund, czyli bardzo zbliżone do chwilowych. W celu zbadania charakteru pulsacji

¹²⁾ Gustav Tammann. Lehrbuch der Metallographie. 2 wydanie. Lipsk 1921.

¹³⁾ F. Wallerant. Cristallographie. Paris 1909. Rozdział drugi w tym dziele jest poświęcony badaniom doświadczalnym Mügge'go, Baumhauer'a i innych nad niezwykle ciekawymi odkształceniami zachodzącymi w kryształach.

¹⁾ Sprawozdania ogłoszone zostały drukiem, lecz na Zachodzie prawdopodobnie nie są znane.