

JERZY TADEUSZ PINDERA

TECHNIKA ELASTOOPTYCZNYCH BADAŃ
PŁASKIEGO STANU NAPRĘŻENIA

ROZPRAWY
INŻYNIERSKIE

XXVII

SPIS TREŚCI

	Str.
I. Wstęp. Tematyka i organizacja badań elastoptycznych	111
1. Tematyka badań elastoptycznych	111
2. Organizacja badań elastoptycznych	113
II. Technika pracy laboratoryjnej	115
1. Analiza zagadnienia i ułożenia planu badania	115
2. Wykonanie przyrządów i uchwytów realizujących założone obciążenie modelu	115
3. Obróbka materiału na modele	116
3.1. Obróbka cieplna (wygrzewanie)	117
3.2. Obróbka mechaniczna powierzchni	119
4. Wykonanie modelu	122
5. Ustawienie i regulacja aparatury. Zamocowanie modelu w urządzeniu obciążającym	127
5.1. Aparatura pomiarowa	128
6. Wykonanie pomiaru	133
7. Opracowanie wyników pomiaru	136
8. Analiza wyników pomiaru	140
9. Opracowanie wyników badania	140
10. Opracowanie sprawozdania	140
11. Ocena dokładności wyników	142
III. Czynniki wpływające na dokładność wyników. Źródła błędów	144
1. Wpływ własności materiału na modele	144
2. Wpływ wykonania modelu	154
2.1. Wady kształtu geometrycznego modelu	154
2.2. Naprężenia obróbcze	155
3. Wady układu optycznego oraz wady jego ustawienia	157
4. Wpływ dokładności i wartości obciążenia	160
5. Wpływ techniki rejestracji	168
5.1. Rejestracja izoklin	168
5.2. Rejestracja izochrom	171
5.3. Kopiowanie negatywów	172

I. WSTĘP. TEMATYKA I ORGANIZACJA BADAŃ ELASTOPTYCZNYCH

Przy organizowaniu pracowni elastooptyki jest rzeczą konieczną możliwie wyczerpujące ustalenie rodzaju, zakresu i charakteru badań. Ustalenie takie przesądza o wyposażeniu pracowni i wytycza jej linię rozwojową, a tym samym decyduje o technice prowadzenia badań.

1. Tematyka badań elastooptycznych

Wyodrębnimy następujące zasadnicze kierunki badań elastooptycznych:

- (A) prace długoplanowe o znaczeniu naukowo-technicznym,
- (B) prace bieżące i doraźne o charakterze naukowo-technicznym i technicznym,
- (C) badania naukowe nad samą metodą oraz nad techniką laboratoryjną.

(A) Do prac długoplanowych o znaczeniu naukowo-technicznym zaliczyć można:

(1) Badania i prace nad ustaleniem współczynników kształtu typowych elementów i szczegółów konstrukcyjnych w zależności od rodzaju obciążenia i sposobu jego przyłożenia.

Badania te powinny być prowadzone systematycznie w łączności z większymi biurami konstrukcyjnymi.

(2) Badania i prace nad kształtowaniem wytrzymałościowym typowych elementów konstrukcyjnych oraz nad charakterystycznymi połączeniami. Badania te powinny być prowadzone w łączności z ośrodkami normalizacyjnymi oraz z większymi biurami konstrukcyjnymi. Mają one na celu ustalenie najbardziej poprawnego kształtu elementów i połączeń normalizowanych oraz ustalenie wytycznych dla poprawnego projektowania elementów oraz połączeń nienormalizowanych.

Przy opracowywaniu wyżej omówionych zagadnień niezbędne jest ściśle powiązanie badań elastooptycznych z badaniami wytrzymałościowymi materiałów i elementów, zwłaszcza zaś ze zmęczeniowymi.

(B) Prace bieżące i doraźne o charakterze naukowo-technicznym i technicznym obejmują konkretne zagadnienia, ograniczone co do swego zakresu, wyłaniające się przy pracach konstruktorskich i naukowych, oraz ekspertyzy.

Do tej grupy zagadnień zaliczyć można:

(1) Zagadnienia kształtowania wytrzymałościowego nieznormalizowanych i nietypowych elementów konstrukcyjnych oraz konstrukcji. Zagadnienia tego typu wyłaniają się przy opracowywaniu prototypów maszyn i urządzeń oraz przy projektowaniu konstrukcji inżynierskich, w szczególności przy projektowaniu węzłów i połączeń.

(2) Zagadnienia wymagające określenia całkowitego pola napięcia. Zagadnienia tego typu, spotykane w badaniach konstrukcji maszynowych raczej rzadko, wysuwają się na pierwszy plan w badaniach konstrukcji inżynierskich, zwłaszcza zaś przy określaniu pola naprężenia w nowoprojektowanych konstrukcjach, w których analityczne wyznaczenie tego pola z zadowalającą dokładnością nie jest możliwe. Zagadnienia tego typu wyłaniają się również przy sprawdzaniu poprawności i dokładności nowych metod obliczenia.

(3) Zagadnienia specjalne. Do tej grupy zaliczyć należy zagadnienia nie wymienione wyżej. Należec tu będą zagadnienia rozkładu i wartości naprężeń przy obróbce skrawaniem, przy obróbce bezwiórowej, jak również przy walcowaniu, a więc zagadnienia związane z odkształceniami plastycznymi, zagadnienia z dziedziny mechaniki gruntu, górotworów itp. Do grupy tej włączyć należy zagadnienia nietypowe ze względu na sposób przyłożenia obciążenia, np. rozkład i zmiana naprężeń przy uderzeniu, czyli ogólnie ujmując, zagadnienia elastooptyki dynamicznej.

(4) Ekspertyzy.

Omówione wyżej grupy (A) i (B) zagadnień nie zawsze dają się rozwiązać za pomocą metod samej elastooptyki. Korzystamy wówczas z metod uzupełniających, jak metoda kruchych pokryć, metody analogii i inne. Podobnie jak w grupie zagadnień (A), jest rzeczą celową uzupełniać niektóre badania z grupy (B) badaniami wytrzymałościowymi.

(C) W badaniach naukowych nad samą metodą oraz nad techniką laboratoryjną wyodrębnić można następujące kierunki:

(1) Opracowywanie nowych metod pomiarowych, udoskonalenie techniki pomiarowej i laboratoryjnej oraz opracowywanie metod uproszczonych, zapewniających określoną dokładność pomiaru.

(2) Opracowywanie nowych typów przyrządów i aparatury pomiarowej, przyrządów pomocniczych oraz udoskonalanie elementów przyrządów.

(3) Opracowywanie metod cieplnej i mechanicznej obróbki nowych materiałów na modele elastooptyczne oraz współpraca przy przygotowywaniu materiałów na modele.

2. Organizacja badań elastooptycznych

Obecnie ustalają się następujące typy pracowni elastooptyki:

(1) dobrze wyposażone pracownie w dużych ośrodkach badań wytrzymałościowych, będące organiczną częścią grupy doświadczalnej analizy naprężeń;

(2) pracownie istniejące w ramach laboratoriów fabrycznych, w zakładach posiadających większe biura konstrukcyjne;

(3) pracownie przy wyższych uczelniach technicznych, mające przeważnie specjalny charakter.

Pracownie elastooptyki organizowane w ramach grup doświadczalnej analizy naprężeń w większych ośrodkach badań wytrzymałościowych są z zasady tak wyposażone, aby mogły prowadzić samodzielnie badania nad wszystkimi wyżej omówionymi zagadnieniami; rodzaj i jakość posiadanej aparatury oraz przyrządów pomiarowych i pomocniczych posiadanych przez te pracownie umożliwia osiągnięcie wysokiej dokładności wyników.

Pracownie elastooptyki przy wyższych uczelniach technicznych nie są na ogół tak wszechstronnie wyposażone jak pracownie dopiero co omówione, chociaż zwykle posiadają aparaturę umożliwiającą wykonywanie specjalnych prac naukowych poza pracami o charakterze dydaktycznym.

Pracownie elastooptyki w ramach laboratoriów fabrycznych, związane z większymi biurami konstrukcyjnymi (u nas nie wprowadzone, chociaż przed wojną były dążenia w tym kierunku), przystosowane są na ogół tylko do rozwiązywania zagadnień kształtowania wytrzymałościowego oraz pewnych zagadnień rozkładu naprężeń, wyłaniających się w toku prac zakładu. Zwykle przy tego rodzaju badaniach ważniejsza jest szybkość otrzymania wyników niż zachowanie dokładności pomiarów.

Wyposażenie takich pracowni, organizowanych w ramach laboratoriów fabrycznych, przystosowane jest do tematyki — jest więc w zasadzie proste i mało kosztowne. Zadaniem pracowni przyfabrycznych jest ułatwienie lub nawet często umożliwienie konstruktorowi lub projektantowi poprawnego kształtowania wytrzymałościowego. Oznacza to umożliwienie właściwego modelowania opracowywanej konstrukcji lub opracowywanego elementu, mające na celu usunięcie niebezpiecznych spiętrzeń

naprężeń oraz maksymalne wykorzystanie materiału dzięki znajomości rozkładu naprężeń.

Oczywistą jest rzeczą, iż stan oraz kwalifikacje personelu pracowni elastooptycznych dostosowane być muszą do programu prac oraz do wyposażenia pracowni. Fakt ten dlatego — między innymi — zasługuje na podkreślenie, że odpowiednie opanowanie techniki laboratoryjnej i pomiarowej wymaga określonego czasu.

Wyposażenie laboratorium elastooptyki zależy, oczywiście, od założonego zakresu i charakteru badań i pod tym kątem należy oceniać potrzebę przyrządów w laboratorium. Istnieje jednak pewne minimum wyposażenia; nie spełnienie tego minimum powoduje zwykle wzrost kosztów badania i nieproporcjonalnie duży spadek dokładności wyników. Minimum wyposażenia zależy nie tylko od zakresu i charakteru badań, ale również od możliwości nawiązania współpracy z lepiej wyposażonymi ośrodkami.

Sprawę niezbędnego wyposażenia, ściśle związaną z techniką prowadzenia badań, najwłaściwiej jest rozpatrywać analizując poszczególne stadia badania, tzn. prace przygotowawcze, pomiar i opracowanie wyników badania.

Całość prac związanych z przeprowadzeniem «konwencjonalnego» badania elastooptycznego ¹⁾ rozbić można na następujące etapy:

prace przygotowawcze:

- (1) analiza zagadnienia, ułożenie planu badania,
- (2) zaprojektowanie i wykonanie przyrządów oraz uchwytów realizujących założone obciążenie modelu,
- (3) obróbka materiału na modele,
- (4) wykonanie modelu,
- (5) ustawienie i regulacja aparatury, zamocowanie modelu w urządzeniu obciążającym, regulacja całości;

pomiar:

- (6) wykonanie pomiaru,
- (7) opracowanie wyników pomiaru;

opracowanie wyników badania:

- (8) analiza wyników pomiaru,
- (9) opracowanie wyników badania,
- (10) sformułowanie wniosków, opracowanie sprawozdania.

¹⁾ Przez «konwencjonalne badanie elastooptyczne» autor rozumie badanie płaskiego stanu naprężenia, występującego pod wpływem sił zewnętrznych za pomocą powierzchniowych metod badania.

W dalszym ciągu potraktowane zostaną szerzej jedynie zagadnienia związane bezpośrednio z techniką pracy laboratoryjnej w laboratorium elastooptyki, przy wykonywaniu badań konwencjonalnych, czyli zagadnienia wymienione wyżej w punktach (3) - (7).

Praca niniejsza oparta jest o doświadczenia autora, poczynione w toku prac kierowanego przezeń laboratorium elastooptyki oraz pracowni analizy naprężeń. Tam też zaprojektował autor opisywaną aparaturę pomiarową, przyrządy pomocnicze oraz obrabiarki do plastyków. Przy projektowaniu przyrządów i urządzeń oraz przy wykonaniu zdjęć i opracowaniu opisów współpracowali z autorem Z. L e s z c z y ń s k i, T. R o ż n o w s k i, Z. R ó ż a ń s k i i E. W ł a ż n i k.

II. TECHNIKA PRACY LABORATORYJNEJ

1. Analiza zagadnienia i ułożenie planu badania

Na podstawie analizy projektowanego tematu układa się plan badania, określający ściśle zakres badań. Uwzględnia on możliwości pracowni oraz dokładność pracy posiadanych przyrządów. Należy z góry — na podstawie danych z poprzednich badań — określić orientacyjnie przewidywany stopień dokładności pomiaru i skonfrontować go z żadaną dokładnością pomiaru. Plan badania określa, jakie stadium prac na jakich przyrządach będzie wykonywane, oraz ustala technikę pomiaru i stosowane metody. Wszystkie elementy planu badania powinny być ze sobą starannie scharmonizowane.

2. Wykonanie przyrządów i uchwytów realizujących założone obciążenie modelu

Jakość i dokładność przyrządów i uchwytów decyduje w zasadniczym stopniu o poprawności otrzymanych wyników. Projektując przyrządy obciążające należy brać pod uwagę względnie niski moduł sprężystości plastyków, co wywołuje stosunkowo znaczne odkształcenia modelu w granicach naprężeń dopuszczalnych. W pewnych warunkach odkształcenia te spowodować mogą nawet zmianę wartości momentów obciążających oraz zmianę kierunku działania lub wartości sił obciążających. Zapobiega się temu stosując ciągłą regulację przyrządu obciążającego.

Szczególnie starannie należy zanalizować możliwość wystąpienia nieprzewidzianych sił tarcia. Jeśli natomiast, zgodnie z założeniem, siły tarcia mają występować, to celowe jest takie rozwiązanie przyrządu, aby można było mierzyć wartość tych sił. Przyrządy i uchwyty powinny być

tak rozwiązane, aby regulacja ich była łatwa, dokładna i wygodna nawet w warunkach częściowo zaciemnionego pomieszczenia. Należy również baczyć, aby przyrządy i uchwyty nie wykazywały znaczniejszych odkształceń pod wpływem przewidywanego obciążenia.

3. Obróbka materiału na modele

Modele do badań elastoptycznych wykonujemy, jak wiadomo, z materiałów przezroczystych, posiadających odpowiednie własności wytrzymałościowe i optyczne. Przede wszystkim pożądane są następujące własności: możliwie wysoki moduł sprężystości, możliwie małe pełzanie mechaniczne i optyczne, możliwie wysoka stała elastoptyczna (a więc również możliwie wysoka stała materiałowa), liniowa zależność między efektem elastoptycznym a naprężeniem, możliwie łatwa obrabialność oraz możliwość otrzymania materiału.

Szkło, posiadające doskonałe własności wytrzymałościowe, na przeciętne modele elastoptyczne nie nadaje się ze względu na trudną obróbkę i związany z tym wysoki koszt wykonania modelu oraz ze względu na niską wartość stałej materiałowej; z powyższych względów szkło stosowane jest przy bardzo dokładnych badaniach, jeśli tylko model nie posiada zbyt skomplikowanego kształtu. Przy zwykłych badaniach jako materiał na modele używane są głównie: plexiglas, żywice fenolowe oraz żywice styrenowe. Rzadziej używane są żywice gliptalowe (ze względu na wysoki koszt) oraz celuloid (ze względu na niekorzystne własności wytrzymałościowe).

Do zwykłych badań elastoptycznych płaskiego stanu naprężenia używamy modeli wyciętych z arkuszy plastyków o grubościach zawartych w granicach od 4 do 10 mm. Arkusze cieńsze stosuje się przy badaniach powłok oraz płyt rozciąganych; arkusze grubsze używamy na modele, które mają być obciążone siłami ściskającymi oraz na modele o większych wymiarach. Zwykle grubość modelu nie przekracza 10 mm ze względu — między innymi — na to, iż im grubszy jest model, tym dokładniej musi pracować układ optyczny polaryskopu, aby otrzymać poprawny obraz modelu na ekranie lub na matówce aparatu fotograficznego.

Arkusze (płyty) plastyku, z której ma zostać wykonany model, poza możliwie wysokim modułem sprężystości i wysoką wytrzymałością dołączną musi wykazywać możliwie małe pełzanie pod obciążeniem stosowanym w doświadczeniu. Poza tym powinien wykazywać możliwie małą anizotropię optyczną przy prześwietlaniu, zarówno w płaszczyźnie prostopadłej, jak i równoległej do powierzchni czołowej płyty, oraz posiadać przezroczyste, możliwie płaskie i równoległe powierzchnie czołowe.

Zwykle otrzymane od dostawcy arkusze plastyków spełniają powyższe warunki w stopniu niedostatecznym; celem odpowiedniej obróbki arkusza plastyku jest zmiana jego własności w pożądanym kierunku oraz doprowadzenie powierzchni czołowej do pożądanego stanu.

Z wymienionych wyżej plastyków jedynie plexiglas nie wymaga żadnej obróbki. Jego własności wytrzymałościowe są zadowalające (niezależnie od tego, nie znamy sposobów ich polepszenia), pełzanie — tak mechaniczne jak i optyczne — w granicach stosowanych naprężeń można pominąć, odznacza się on — w granicach dokładnych pomiarów laboratoryjnych — zupełnym brakiem anizotropii, zarówno mechanicznej, jak i optycznej, oraz dostarczany jest w płytach o zupełnie płaskiej i przezroczystej powierzchni, nie ustępującej powierzchni szkła zwierciadlanego. Inne plastyki dostarczane są zwykle w stanie wymagającym starannej obróbki, z wyjątkiem należącego do żywic styrenowych CR - 39, który dostarczany jest w arkuszach o gładkich powierzchniach, nie wykazujących anizotropii optycznej przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowej.

Własności wytrzymałościowe oraz optyczne żywic fenolowych można zmieniać przez odpowiednią obróbkę cieplną.

Obróbkę materiału na modele dzielimy na dwa etapy: obróbkę cieplną całości oraz obróbkę mechaniczną powierzchni czołowych.

Obróbka cieplna ma za zadanie zmniejszenie anizotropii optycznej materiału do dopuszczalnych wartości, czyli równoczesne zmniejszenie naprężeń własnych plastyku oraz — przy żywicach fenolowych — podwyższenie modułu sprężystości i zmniejszenie pełzania, o ile to jest konieczne.

Obróbka mechaniczna czołowych powierzchni arkusza plastyku ma na celu doprowadzenie tych powierzchni, drogą obróbki mechanicznej, do zadowalającej płaskości, gładkości oraz przezroczystości, czyli ma usunąć falistość oraz chropowatość powierzchni.

3.1. Obróbka cieplna (wygrzewanie). Ze względu na charakter procesu obróbczego obróbkę cieplną plastyku nazwijmy wygrzewaniem.

Wygrzewanie, które ma za cel wyłączny usunięcie lub zmniejszenie zbyt znacznej anizotropii optycznej arkusza plastyku, jest prostsze, łatwiejsze i krótsze od obróbki mającej na celu osiągnięcie określonych własności wytrzymałościowych, aczkolwiek wpływa również na te własności.

Wygrzewanie plastyku polega na powolnym, stopniowym podwyższeniu temperatury obrabianej płyty aż do osiągnięcia założonej temperatury wygrzewania, następnie na wygrzewaniu płyty w tej temperaturze przez określony czas (na ogół tym krótszy, im temperatura wygrzewania

jest wyższą) i wreszcie na powolnym, stopniowym ochładzaniu do temperatury pokojowej.

Wyraźna zależność własności wytrzymałościowych żywic fenolowych, stosowanych na modele elastooptyczne, od przebiegu wygrzewania powoduje konieczność zachowania ściśle tych samych warunków wygrzewania dla wszystkich partii płyty plastyku (niedopuszczalne są miejscowe przegrzania lub miejscowe przechłodzenia płyty plastyku, mogące spowodować powstanie miejscowych zmian własności). Wobec tego, że przy obróbce różnych płyt zachodzą w praktyce zawsze pewne zmiany warunków wygrzewania, własności elastooptyczne każdej płyty są nieco inne i muszą być indywidualnie określone. (Wartości cyfrowe podawane we wszelkiego rodzaju zestawieniach i tablicach własności elastooptycznych należy traktować zasadniczo jako wartości orientacyjne).

Otrzymane z wytwórni arkusze plastyku wykazują prawie zawsze mniejszą lub większą anizotropię optyczną, charakteryzującą się efektem elastooptycznym. Rysunek 26 przedstawia zdjęcie elastooptyczne płyty plastyku przechowywanej w laboratorium, wykazującej znaczną anizotropię optyczną. Obrawszy za miarę efektu elastooptycznego wartość rzędu izochromy, występującej przy prześwietlaniu próbki o grubości 10 mm, wyciętej z danego arkusza plastyku, przyjmujemy jako dopuszczalne przy pomiarach dokładnych następujące wartości: około 0,1 rzędu izochromy przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowych oraz około 1,0 rzędu izochromy przy prześwietlaniu równoległym do powierzchni czołowych. Zaznaczyć jednak należy, iż partie przykrawędziowe arkusza plastyku, na przestrzeni kilku milimetrów od krawędzi, wykazywać mogą znacznie wyższe wartości rzędu izochrom, nawet po prawidłowo przeprowadzonym wygrzewaniu. Partie te należy obciąć.

W przypadku gdy efekt elastooptyczny występujący po dokonanych wygrzewaniu przyjmuje wartości wyższe od podanych poprzednio, jest rzeczą celową powtórne przeprowadzenie wygrzewania. Właściwsze i bezpieczniejsze jest wygrzewanie w temperaturze bliższej dolnej granicy temperatur, pomimo tego, że trwa ono dłużej i często musi być powtarzane. Żywice fenolowe wygrzewa się zwykle w temperaturach 85-115°C, [2], [5], [8], [9], [15].

Obróbkę cieplną arkuszy plastyku przeprowadzić można w piecykach elektrycznych z regulacją temperatury, w specjalnych komorach zasilanych ciepłym powietrzem o żądanej temperaturze lub, po prostu, w wannach wypełnionych olejem, podgrzewanych kuchenką elektryczną lub palnikiem gazowym. Najprostszym sposobem wygrzewania materiału na modele jest wprawdzie wygrzewanie w kąpieli olejowej, nie jest to jednak sposób wygodny. Jeśli prowadzone są w laboratorium systema-

tyczne prace, to opłaca się zainstalowanie piecyka elektrycznego z regulacją temperatury lub specjalnej komory do wygrzewania, [7]. W ostatnich czasach budowane są piecyki wyposażone w automatyczną regulację przebiegu temperatury (E. S h i l t k n e c h t, Zurych).

Przy wygrzewaniu w piecyku należy baczyć, aby elementy grzejne — jeśli są one nieosłonięte — nie promieniowały bezpośrednio na wygrzewany plastik, gdyż w przeciwnym wypadku nie jest możliwe uniknięcie miejscowych różnic temperatury.

Jeśli obrabiany plastik jest żywicą fenolową będącą, jak wiadomo, polikondensatem, to celowe, a często i konieczne, jest przedsięwzięcie specjalnych środków, zapobiegających zmianom zawartości wilgoci w plastyku, w trakcie wygrzewania.

Technikę wygrzewania żywic fenolowych, w szczególności dekoritu 300 a, podali L. F ö p p l i M. M ö n c h w swojej *Praktische Spannungsoptik*, [2]. Zastosowali oni owijanie wygrzewanych modeli w szczelnie przylegającą folię cynową; owinięcie to redukuje zmiany zawartości wilgoci w wygrzewanym plastyku. Wydaje się, iż wygrzewanie żywic fenolowych, przy zachowaniu stale tej samej wilgotności względnej powietrza w piecyku przez cały czas wygrzewania, da również dodatnie wyniki.

Należy zawsze pamiętać o tym, iż właściwa obróbka cieplna arkusza plastyku w przypadku żywic fenolowych zmniejsza znakomicie prędkość narastania efektu naskórkowego, którego wpływ uwidacznia się szczególnie jaskrawo na świeżo obrobionych krawędziach modelu wyciętego z takiego arkusza, [5], [15].

3.2. Obróbka mechaniczna powierzchni. Powierzchnie czołowe płyt plastyku dostarczanych przez wytwórnie lub płyt poddanych obróbce cieplnej posiadają zwykle nierówności, rysy i zmętnienia uniemożliwiające dokonanie poprawnego pomiaru. Powierzchnie te muszą zostać doprowadzone do odpowiedniego stanu gładkości i płaskości. Bezwarunkowo wymagana jest przezroczystość powierzchni; chropowatość powierzchni nie może być zauważona gołym okiem, tzn. nierówności nie mogą przekraczać ułamka mikrona. Stopień dopuszczalnej falistości powierzchni arkusza plastyku przygotowanego do wycięcia modelu zależy od rodzaju układu optycznego polaryskopu, na którym mają zostać wykonane pomiary. Jeśli polaryskop pracuje przy użyciu równoległej wiązki światła o wysokiej jakości, to sfałowania powierzchni, które można zauważyć gołym okiem, nie są dopuszczalne; jeśli natomiast polaryskop pracuje przy użyciu powierzchniowego źródła światła, to wymagania stawiane powierzchniom czołowym płyty plastyku są znacznie mniej ostre.

Przy pracach dokładniejszych obie powierzchnie czołowe powinny być całkowicie płaskie, gładkie, przezroczyste i pozbawione rys, [5], [9].

Materiał szlifuje i poleruje się zasadniczo po wygrzaniu. Jeśli jednak po wyszlifowaniu i wypolerowaniu arkusza plastyku okaże się, iż posiada on jeszcze zbyt wielką anizotropię optyczną, to należy go wygrzać powtórnie a potem, w miarę potrzeby, powtórnie wyszlifować lub tylko wypolerować.

Szlifowanie ma na celu usunięcie falistości powierzchni oraz grubszych rys. Po prawidłowo wykonanym szlifowaniu powierzchnia obrabianego arkusza jest jednostajnie matowa i nie posiada nierówności oraz rys, widocznych gołym okiem. Dobroć szlifowania sprawdza się za pomocą lupy; do sprawdzenia należy arkusz obrabiany umyć i wysuszyć. Kontrolę stanu powierzchni przy obróbce przeprowadza się często, przeto — aby skrócić czas suszenia — wygodnie jest użyć do tego celu ręcznej suszarki do włosów.

Szlifuje się za pomocą proszków ściernych, np. proszków karborundowych lub korundowych, które są łatwo dostępne w kraju.

Gdy nierówności i rysy powierzchni są głębsze, używamy do szlifowania proszków o ziarnach większych, stopniowo przechodząc do proszków o mniejszych ziarnach. Po każdym zakończeniu szlifowania określonym numerem proszku ściernego należy arkusz plastyku starannie obmyć i wysuszyć, gdyż nawet jedno ziarenko proszku o większych wymiarach, które dostanie się na powierzchnię obrabianą proszkiem drobniejszym, może zniweczyć kilkugodzinną pracę.

Zwykle do wyszlifowania nierównej nawet powierzchni wystarcza komplet proszków w granicach numerów 120-360(400). Doświadczenie nasze wykazało, iż na ogół wystarcza zestaw proszków w granicach numerów 270-360(400). (Numer proszku ściernego równy jest liczbie oczek sita na długości jednego cala, przez które ziarna proszku jeszcze przechodzą).

Szlifowanie można uważać za zakończone, gdy nierówności obrabianej powierzchni nie przekraczają 5-10 mikronów. Dalszą obróbkę wykonuje się za pomocą proszków do polerowania, np. tlenku żelaza lub tlenku glinu. Wykończenie polerowania robi się proszkami o grubości ziaren poniżej jednego mikrona.

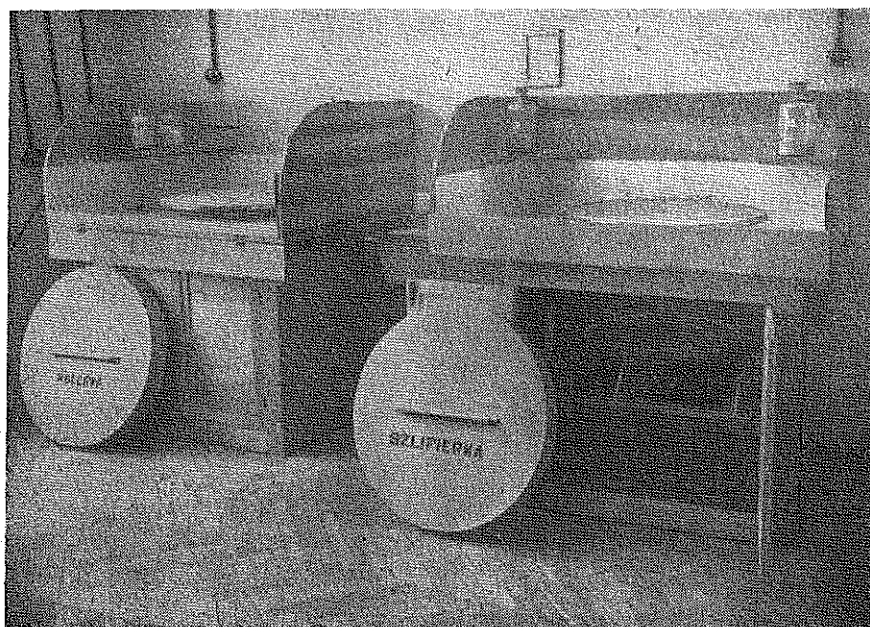
Polerowanie można uważać za zakończone, gdy polerowana powierzchnia nie wykazuje żadnych rys i zmętnień, tzn. gdy jest przezroczysta. Ma to miejsce wówczas, gdy nierówności polerowanej powierzchni są rzędu 0,1-0,2 mikrona.

Polerowanie, podobnie jak szlifowanie, wykonuje się zwykle przy użyciu proszków o różnych średnicach ziaren.

Pojedyncze rysy pochodzące od zabłąkanych ziaren są dopuszczalne, o ile nie przecinają miejsc, w których oczekujemy spiętrzenia naprężeń.

Obróbkę mechaniczną powierzchni płyt plastyku dokonywać można całkowicie ręcznie lub mechanicznie.

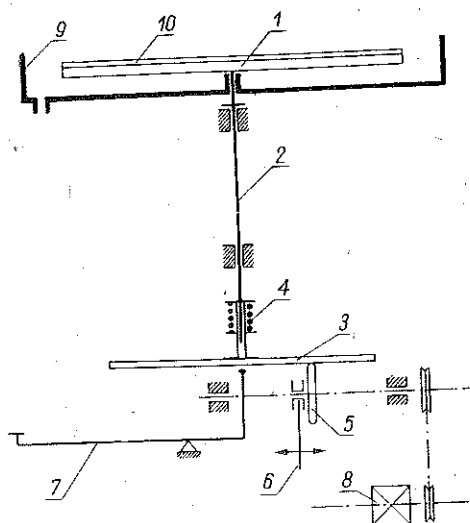
Obróbka ręczna powierzchni jest w zasadzie analogiczna do obróbki ręcznej lakierowanych powierzchni, polegającej na szlifowaniu i polerowaniu obrabianych powierzchni za pomocą odpowiednich proszków lub past do polerowania; nie wymaga więc zasadniczo żadnych specjalnych przyrządów. Obróbka ręczna staje się znużająca i męcząca przy doprowadzaniu do gładkości i przezroczystości powierzchni większych arkuszy plastyku lub większej ilości tych arkuszy. W takich przypadkach opłaca się stosować obróbkę częściowo zmechanizowaną.



Rys. 1. Fragment modelarni laboratorium elastooptyki — szlifierka i polerka do plastyków

Obróbka zmechanizowana — krótko, mechaniczna — jest wygodniejsza, szybsza, tańsza i dokładniejsza. Autor przeprowadzał obróbkę powierzchni płyt plastyku na specjalnie do tego celu zaprojektowanych obrabiarkach — szlifierce i polerce — przedstawionych na rys. 1. Schemat obrabiarki podany jest na rys. 2. Obrabiarki te podobne są w zasadzie do znanych szlifierek do szkła o poziomej tarczy, [7], [9]. Szlifierka i polerka posiadają identyczną budowę. Zasadniczym ich elementem jest

okrągła tarcza o średnicy 780 mm umieszczona poziomo. Obie obrabiarki posiadają indywidualny napęd elektryczny. Obroty tarcz regulowane są



Rys. 2. Schemat szlifiarki do plastyków (typ JP-4)

1-tarcza robocza, 2-wał główny, 3-tarcza napędowa, 4-sprężyna dociskowa, 5-kółko napędowe, 6-popychacz, 7-dźwignia, 8-silnik elektryczny, 9-wanna, 10-okładzina tarczy

w sposób ciągły za pomocą przekładni ciernej w zakresie 60-200 obr/min. Tarcza szlifiarki obłana jest warstwą wosku pszczelnego. Tarcza polerki wyklejona jest miękkim filcem w dobrym gatunku. Tarcze szlifiarki i polerki są w trakcie pracy zwilżane wodą i posypywane odpowiednimi proszkami szlifierskimi oraz polerskimi. Materiał obrabiany, który przymocowany jest do płaskiej płyty z duralu, tak zwanej packi, zaopatrzonej w uchwyt do rąk, jest lekko przyciskany do obracającej się tarczy.

Opisane wyżej obrabiarki pracują zadowalająco.

Kontrolę stanu powierzchni w trakcie szlifowania wstępnego przeprowadza się wygodnie za pomocą ręcznych lup o powiększeniu trój- i pięciokrotnym. Kontrolę powierzchni po

zakończeniu szlifowania oraz w trakcie polerowania wygodnie jest przeprowadzić za pomocą lupy biokularowej.

4. Wykonanie modelu

Model wycinamy z przygotowanego uprzednio arkusza plastyku. Regułą jest, iż po wycięciu modelu z arkusza plastyku nie może on być już ani obrabiany cieplnie (chyba że stosuje się metodę M o n c h a, [8]), ani jego powierzchnie nie mogą być poddane obróbce mechanicznej. Płyta plastyku przygotowana do wycięcia modelu musi więc spełniać minimum warunków, zależne od charakteru badania, omówionych wyżej. Stan płyty nie powinien w trakcie wykonywania modelu ulec pogorszeniu, to znaczy, powierzchnie czołowe nie mogą zostać uszkodzone i nie mogą powstać odkształcenia plastyczne od nacisku narzędzi obrabiających lub od nacisku przyrządów utwierdzających.

Wykonanie modelu powinno być bardzo staranne, gdyż operacja ta decyduje w sposób zasadniczy o dobroci wyników pomiaru, a w konsekwencji o dokładności wyników badania, [5], [9], [11], [15], [16].

Ze względów technicznych (łatwość badania, dokładność wyników, koszt i czas pomiarów, handlowe wymiary arkuszy plastyku itd.) modele wykonywane są na ogół w zmniejszeniu, rzadziej w powiększeniu.

Przy wykonywaniu modelu — zgodnie z prawami podobieństwa dla płaskiego rozkładu naprężeń — należy zachować ściśle geometryczne podobieństwo wymiarów w płaszczyźnie tarczy, natomiast grubość modelu może być brana dowolnie. Zwykle modele wykonuje się z płyt plastyku o grubościach 4-10 mm.

Podczas wykonywania modelu należy zwrócić szczególną uwagę na to, aby:

(a) odchylenia wymiarowe wykonywanego modelu zawierały się w granicach przyjętych za dopuszczalne;

(b) nie powstały odkształcenia plastyczne, powodujące z kolei powstanie naprężeń własnych; odkształcenia takie powstać mogą na krawędziach obrabianych od zbyt dużego nacisku narzędzi skrawających (zwłaszcza gdy zachodzi zbyt wielki wzrost temperatury) oraz w miejscach zamocowania modelu od nieprawidłowo pracujących uchwytów utwierdzających;

(c) obrabiane powierzchnie krawędziowe były prostopadłe do powierzchni czołowych modelu;

(d) krawędzie modelu nie uległy załamaniu;

(e) czas wykonania modelu był możliwie krótki i nie przekraczał kilku godzin (nie dotyczy to modeli wykonanych z plastyków, w których prędkość narastania efektu naskórkowego jest nieznaczna, jak np. w prawidłowo przechowanym plexiglasie).

Technikę wykonywania modelu należy tak opracować, aby zachowanie podanych wyżej warunków było możliwe i łatwe.

Po wykonaniu modelu jest rzeczą celową naniesienie na jego czołowej powierzchni odpowiednio dobranej sieci współrzędnych.

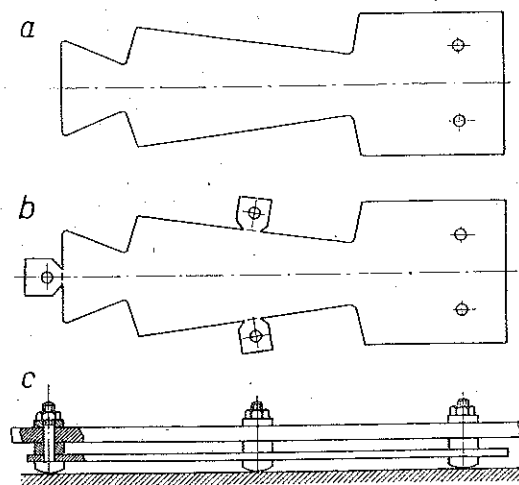
Najprostszym sposobem wykonania modelu jest wycięcie ręczne za pomocą piłeczki (tzw. laubzegi), a następnie dopiłowanie do żądanych wymiarów za pomocą pilnika. Przy tym sposobie kontur modelu musi być wytrasowany na plastyku lub narysowany na papierze przyklejonym następnie do plastyku. Sposób ten jest wprawdzie bardzo prosty, ale niewygodny i żmudny i wymaga znacznej zręczności i wprawy; z tych względów nadaje się zasadniczo tylko do doraźnego wykonywania małych i prostych modeli. Udoskonaleniem powyższego sposobu jest wykonanie ręczne za pomocą wzornika, [9]. Wzornik (szablon), wykonany z blachy ze stali miękkiej o grubości 1-3 mm, zostaje złączony za pomocą śrub z materiałem obrabianym; model wykonuje się jak wyżej za pomocą piłeczki i pilnika. Sposób ten jest znacznie wygodniejszy

od poprzedniego, gdyż ułatwia znakomicie zachowanie wymiarów modelu oraz eliminuje uciążliwe trasowanie na arkuszu plastyku. Tym niemniej wykonanie modelu trwa dość długo, a poza tym wymaga dostatecznej wprawy. Zastosowanie dwóch wzorników, obejmujących płytę plastyku z obu stron, znacznie ułatwia i przyspiesza wykonywanie modelu a nadto zapewnia zachowanie prostokątności powierzchni brzegowych modelu do jego powierzchni czołowych, umożliwiając wykonywanie modelu przez mniej wprawnego pracownika.

Często stosowana obróbka modelu na frezarce lub na frezarko-kopiarce, [1], [2], [3], [7], [9], jest wprawdzie bardzo dokładna, ale pochłania również dużo czasu.

Dobre wyniki daje opracowana i stosowana przez autora metoda wykonywania modelu za pomocą jednego wzornika na specjalnie do tego celu zaprojektowanej prostej obrabiarce, zwanej wycinarką.

Pierwsza zaprojektowana przez autora wycinarka posiada poziomy stół o gładkiej, szlifowanej powierzchni, o wymiarach 500×600 mm.



Rys. 3. Przykład wykonania wzornika oraz połączenie wzornika z arkuszem plastyku
a-kształt modelu, b-kształt wzornika wraz z naddatkami do umocowania plastyku, c-połączenie wzornika z arkuszem plastyku

W bliskości środka stołu znajduje się otwór o średnicy 8 mm, przez który przechodzi frez pałcowy o pionowej osi. Frez ten zamocowany jest w tulei zaciskowej, która znajduje się we wrzecionie, umieszczonym tuż pod stołem. Frez jest tak zamocowany, iż jego część walcowa wystaje kilka milimetrów nad powierzchnią stołu. Arkusz plastyku, z którego ma zostać wycięty model, zostaje przymocowany do wykonanego uprzednio wzornika za pomocą kilku śrub tak, iż między nami a wzornikiem istnieje odległość kilku milimetrów. Wzornik wykonany jest z blachy ze stali miękkiej o grubości 1,5-3 mm. Par-

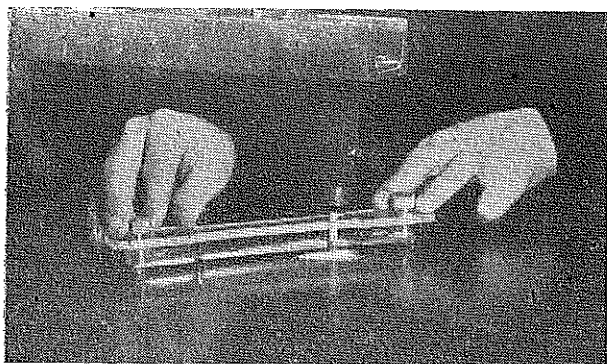
cie arkusza plastyku, w którym znajdują się otwory do śrub mocujących plastik ze wzornikiem, zostają obcięte po wykonaniu modelu. Rysunek 3 przedstawia schemat połączenia arkusza plastyku ze wzornikiem modelu.

Frez napędzany jest silnikiem elektrycznym o mocy 200 W poprzez przekładnię pasową (pas klinowy). Po uruchomieniu silnika spoczywa-

jący na stole wzornik z przymocowanym arkuszem plastyku dosuwa się do freza tak długo, aż krawędź wzornika zetknie się z walcową częścią freza, po czym wzornik zostaje przesuwany po stole w ten sposób, iż kontur wzornika przesuwa się w stosunku do freza, pozostając z nim w stałej styczności. W tym czasie zeby freza atakują arkusz plastyku wycinając z niego kształt identyczny z kształtem wzornika. Rysunek 4 przedstawia schemat pracy wycinarki. Rysunek 5 przedstawia wycinarkę w trakcie wykonywania modelu, zaś rys. 7 ogólny widok wycinarki.

Do wycinania modeli stosowane są zwykle frezy palcowe o średnicach 4-6 mm. Obróty freza regulowane są skokami w zakresie 700-5000 obr/min.

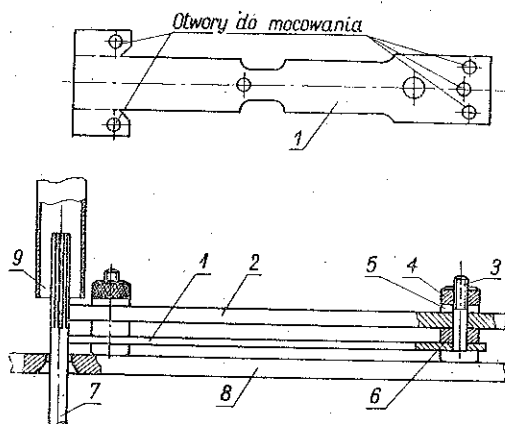
Wadami opisanej wycinarki są: zbyt mała powierzchnia stołu oraz brak wyciągu. Szczególnie niekorzystny jest brak wyciągu, gdyż odpływ wiórów nie jest dostatecznie swobodny, a wydzielające się przy obróbce żywic fenelowych gazy i pary działają ujemnie na drogi oddechowe oraz błony śluzowe pracującego przy wycinarce; jest to nieprzyjemne i szkodliwe dla zdrowia.



Rys. 5. Wycinanie modelu na wycinarce

dla wiórów, par i gazów powstających przy wycinaniu modelu.

Przewidywana ciągła regulacja obrotów freza pozwoli na dobranie optymalnych warunków skrawania. Jest to bardzo istotne, gdyż na ilość ciepła wywiązującego się przy skrawaniu i podwyższającego temperaturę



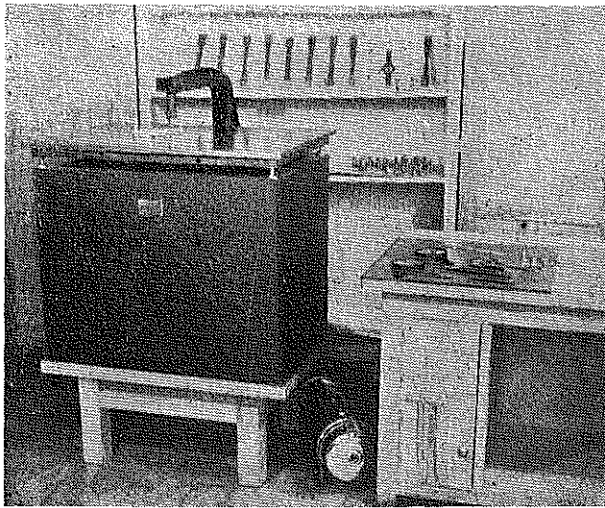
Rys. 4. Schemat pracy wycinarki

1-wzornik, 2-materiał modelu, 3-sworzeń łączący, 4-nakrętka, 5-podkładka nakrętki, 6-podkładka dystansowa, 7-frez palcowy, 8-stół wycinarki, 9-tuleja ochronna

Zaprojektowana przez autora wycinarka (rys. 6) jest pozbawiona tych wad; wymiary stołu wynoszą 600 cm × 800 cm, zaś ochrona i osłona freza stanowi jednocześnie końcówkę urządzenia wyciągowego

materiału obrabianego, a więc pośrednio na wartość efektu obróbczego, mają wpływ dwa główne czynniki: tarcie narzędzia o materiał oraz wartość pracy niezbędnej do pokonania spójności materiału. O ile wpływ tarcia zwiększa się ze wzrostem obrotów freza, to praca niezbędna do pokonania spójności materiału zmienia się w sposób bardziej zawily, na ogół maleje ze wzrostem obrotów i to skokami, [17], bywa jednak i tak, że dla pewnego zakresu prędkości wzrasta.

Jest rzeczą celową podzielić wycinanie modelu na dwie operacje: na wycięcie z grubsza i na wycięcie wykończające. Wycięcie z grubsza



Rys. 6. Fragment modelarni laboratorium elastooptyki—wycinarka do modeli (typ JP-3A), konstrukcji autora, wraz z wycinanym modelem oraz przyrządami pomocniczymi

polega na wycięciu modelu z naddatkiem 2-3 milimetrów; można je wykonać ręcznie za pomocą piłeczki lub na wycinarce. Przy tym wycięciu nie jest rzeczą konieczną zachowanie dużej ostrożności.

Wycięcie wykończające należy wykonać bardzo starannie. Frez musi być ostry. Zasadą jest, iż frez raz użyty do metalu jest z reguły za tępy do wycinania modeli elastooptycznych. Pożądane jest, aby przy przejściu od wycinania pierwszego do wycinania wykoń-

czającego zmienić frez na ostrzejszy. Na rys. 7 widoczny jest wzornik przygotowany do obróbki wykończającej z przymocowanym doń arkuszem plastyku.

Wykonywanie modeli na wycinarce — jak przekonuje dotychczasowe doświadczenie — jest tanie, dokładne i szybkie.

W trakcie wycinania należy bacznie uważać, aby obrabiany arkusz plastyku wraz z wzornikiem przesuwany był powoli, płynnie, bez szarpnięć lub uderzeń. Dbać należy o swobodny odpływ wiórów. Nadmierne podwyższenie temperatury w miejscach obrabianych ułatwia powstawanie odkształceń plastycznych na krawędzi materiału, gdy nacisk freza jest zbyt duży. Odkształcenia plastyczne na obrabianych krawędziach.

powodują powstanie naprężeń krawędziowych, zwanych naprężeniami obróbczymi. Naprężenia te utrudniają, a często uniemożliwiają, przeprowadzenie dokładnych pomiarów.

Kierunek przesuwania wycinanego modelu należy tak zestroić z kierunkiem obrotu freza, aby naroża zewnętrzne modelu nie były narażone na wyłupanie na skutek uderzeń zębów freza.

Po wycięciu modelu na wycinarce okazuje się czasem, iż niektóre partie krawędzi są nieco chropowate; nierówności te wyrównuje się delikatnie drobnym pilnikiem, nie odłączając wzornika od modelu. Wyrównanie takie zmniejsza często ewentualne drobne naprężenia obróbcze. Przy tej operacji należy uważać, aby nie załamać krawędzi modelu, gdyż załamanie takie powoduje powstanie grubej linii konturowej w odpowiednim miejscu na obrazie modelu.

Ze względu na niebezpieczeństwo załamania krawędzi model po wycięciu nie może już być polerowany w partiach przykrawędziowych; należy więc model wykonywać bardzo ostrożnie, aby nie porysować jego powierzchni.

Po wykonaniu modelu jest rzeczą celową naniesienie na nim siatki współrzędnych, gdyż ułatwia ona znakomicie odczytywanie zdjęć.

Przed przekazaniem modelu do badania należy uprzednio starannie sprawdzić jakość jego wykonania.

5. Ustawienie i regulacja aparatury. Zamocowanie modelu w urządzeniu obciążającym

Zasadą jest, aby właściwe ustawienie aparatury oraz jej wstępna regulacja, jak również zmontowanie i wypróbowanie urządzenia obciążającego, dokonane zostało przed wykonaniem modelu, tak aby model bezpośrednio po wykonaniu i sprawdzeniu mógł zostać zamocowany w urządzeniu obciążającym i być zaraz badany. Ustawienie i regulacja aparatury obejmuje dostosowanie polaryskopu do rodzaju badania, umocowanie odpowiednich przyrządów pomiarowych i pomocniczych, dobranie odpowiedniego powiększenia obrazu oraz wyregulowanie całości. Urządzenie obciążające należy po zmontowaniu sprawdzić pod względem poprawności i dokładności działania. Wyżej wymienione czynności należy zakończyć przed rozpoczęciem wykonywania modelu.

Przyrządy i uchwyty obciążające powinny być zawczasu zamontowane i ustawione; najwygodniej jest dokonać tego za pomocą wzornika, według którego wykonywany jest model. Zasadą jest, aby model bezpośrednio po wykonaniu i sprawdzeniu został umieszczony w przyrządzie i badany, chyba że jest wykonany z materiału nie wykazującego efektu naskórkowego.

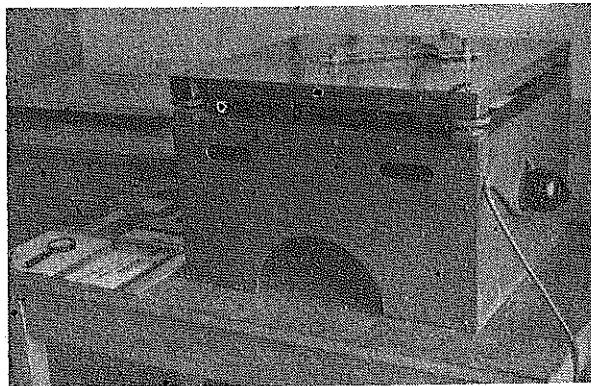
Po wykonaniu modelu zostaje on umocowany w urządzeniu obciążającym i wstępnie obciążony; obciążenie wstępne powinno być stosunkowo nieznaczne. Obciążenie wstępne modelu ma umożliwić ostateczne sprawdzenie dokładności ustawienia i pracy polaryskopu, dokładności ustawienia i działania urządzenia obciążającego oraz dokładności ustawienia i obciążenia modelu.

Przy umocowaniu modelu należy szczególnie uważać, by jego powierzchnia była prostopadła do osi optycznej polaryskopu oraz aby wypadkowe sił obciążających leżały w jego środkowej płaszczyźnie. Przyrząd należy wyregulować tak, aby na tle jednorodnego, pozbawionego plam pola widzenia model rysował się czysto i ostro; linie konturów powinny być cienkie i ciągle, jednostajnie czarne. Często występującym błędem ustawienia na ostrość jest podwojenie czarnej linii konturowej jasną linią leżącą w jej bezpośrednim sąsiedztwie.

Przed obciążeniem modelu należy jeszcze sprawdzić, czy nie występują gdziekolwiek niepożądane siły tarcia.

Po dodatnim wyniku sprawdzenia, przy wstępnym obciążeniu modelu, całość urządzenia uważać można za gotową do przeprowadzenia pomiaru.

Kontrolując działanie urządzenia obciążającego należy sprawdzić, czy przy wzroście wartości sił i momentów obciążających siły obciążające nie zmieniają wyraźnie swego kierunku działania w stosunku do modelu i czy nie zmieniają przez to w sposób nieprzewidziany swej wartości; na-



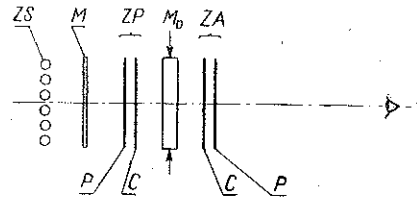
Rys. 7. Wycinarka typ JP-3

stąpić to może, na przykład, na skutek znaczniejszych odkształceń modelu lub na skutek zbyt dużych luzów w połączeniach. Każdy przyrząd i każde urządzenie obciążające powinno być zbadane z tego punktu widzenia.

5.1. Aparatura pomiarowa. Podstawowym przyrządem pomiarowym jest polaryskop elastooptyczny. Polaryskopy elastooptyczne budowane są w wersjach,

różniących się tak układem, jak i rozwiązaniem konstrukcyjnym, [1], [2], [3], [6], [7], [10], [11]. Rysunek 8 podaje schemat jednego z najprostszych, zaś rys. 9 — jednego z bardziej złożonych polarysko-

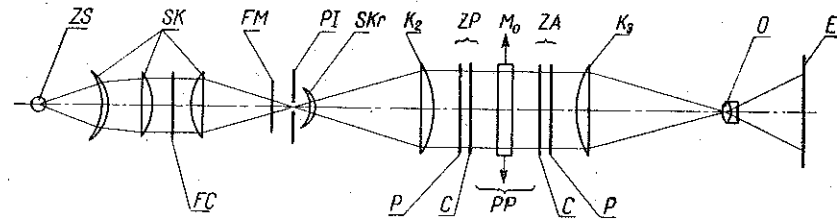
pów elastoptycznych. Polaryskopy o prostszych układach budowane są zwykle możliwie prosto i tanio. Polaryskopy o układach bardziej złożonych konstruowane są na ogół bardzo starannie, posiadają dokładną regulację i są często wyposażone w urządzenia zdalnie sterujące. Jednym z często spotykanych układów, pośrednich pomiędzy wyżej podanymi, jest układ o schemacie podanym na rys. 10. Na takim układzie oparty jest polaryskop o średnicy pola widzenia 150 mm., zbudowany przez autora w jednym z instytutów. Przy użyciu źródła światła o skoncentrowanej powierzchni świecącej układ ten pracuje zupełnie zadowolająco. Ogólny widok omawianego polaryskopu przedstawiony jest na rys. 11. W polaryskopie tym jako filtr cieplny służy płytka szkła specjalnego (z tlenkiem baru) pochłaniającego promieniowanie podczerwone (produkcji Jeleniogórskiej Wytwórni Optycznej; jest ona pocięta w wąskie paski. Taki filtr cieplny jest często wygodniejszy i bezpieczniejszy w użyciu niż filtr ciekły.



Rys. 8. Schemat jednego z najprostszych typów polaryskopu elastoptycznego

ZS-źródło światła jednobarwnego oraz białego (lampy sodowe oraz lampy rtęciowe lub wolframowe), M-szkło mleczone lub matowe, ZP-zespół polaryzatora, ZA-zespół analizatora, P-polaroid, C-ćwierćfalówka, Mo-model, O-obszerny lub kamera fotograficzna

Schemat podany na rys. 10 można uprościć, umieszczając zamiast soczewki kolimacyjnej K_2 i obiektywu O jeden obiektyw odpowiednio dużej średnicy. Na takiej zasadzie oparty jest zbudowany przez autora ma-

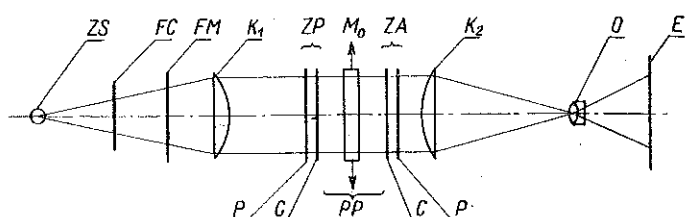


Rys. 9. Schemat polaryskopu elastoptycznego do badań dokładnych i bardzo dokładnych, opracowywanego przez autora; układ optyczny polaryskopu opracowany przez J. Matysiaka; średnica pola widzenia 250 mm

ZS-źródło światła — lampa punktowa, SK-soczewki kondensatora, FC-filtr ciepły, FM-filtr monochromatyczny, PI-przesłona irysowa, SKr-soczewka korygująca, K_2 -soczewka oświetlająca, ZP-zespół polaryzatora, ZA-zespół analizatora, P-polaroid, C-ćwierćfalówka, Mo-model badany, K_3 -soczewka kolimacyjna, O-obiektyw, E-ekran lub matówka aparatu fotograficznego, PP-przestrzeń pomiarowa

ły podręczny polaryskop o średnicy pola widzenia 40 mm, przedstawiony na rys. 12. Polaryskopy oparte na takich układach są proste i łatwe w obsłudze; jako obiektyw nadają się obiektywy od epidiaskopów, które można otrzymać w kraju w rozmiarach średnicy do 110 mm.

Polaryskopy oparte na schemacie przedstawionym na rys. 8, czyli polaryskopy o powierzchniowym źródle światła, spotyka się dość często. Na tym schemacie oparty jest polaryskop elastoptyczny do prac technicz-

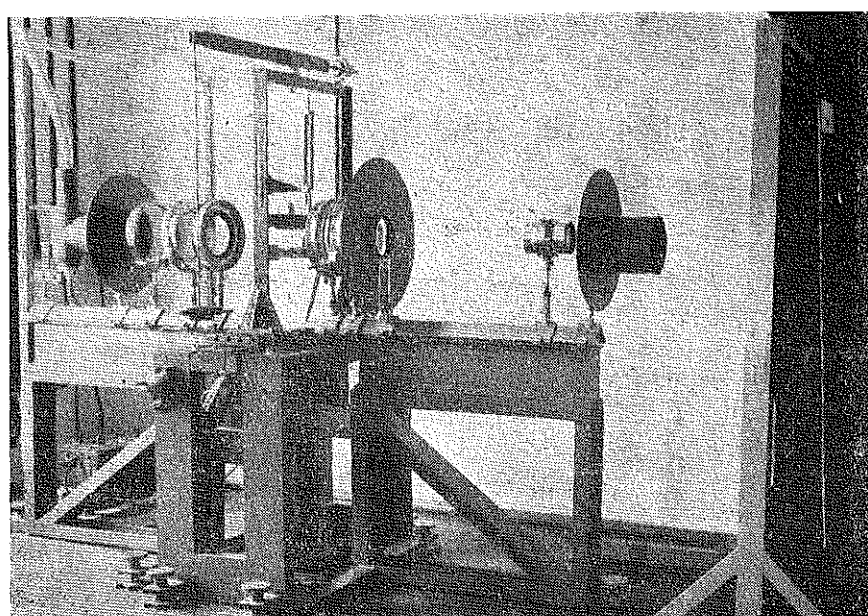


Rys. 10. Często stosowany schemat polaryskopu elastoptycznego

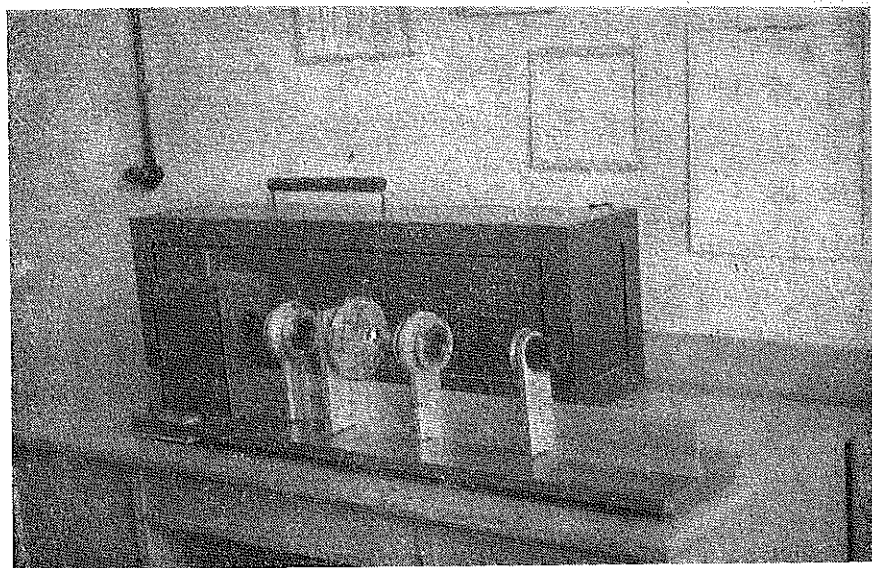
ZS-lampa o skoncentrowanej powierzchni świecącej (pożądana punktowa), FC-filtr cieplny, FM-filtr monochromatyczny, K_1 -kondensator, ZP-zespół polaryzatora, ZA-zespół analizatora, P-polaroid, C-ćwierćfalówka, Mo-model, K_2 -soczewka kolimacyjna, O-obiętyw, E-ekran lub klisza fotograficzna, PP-przestrzeń pomiarowa

nych, zaprojektowany przez autora i wykonany w kilku krajowych laboratoriach elastoptyki; szkic tego przyrządu przedstawia rys. 13 oraz rys. 14 — widok ogólny.

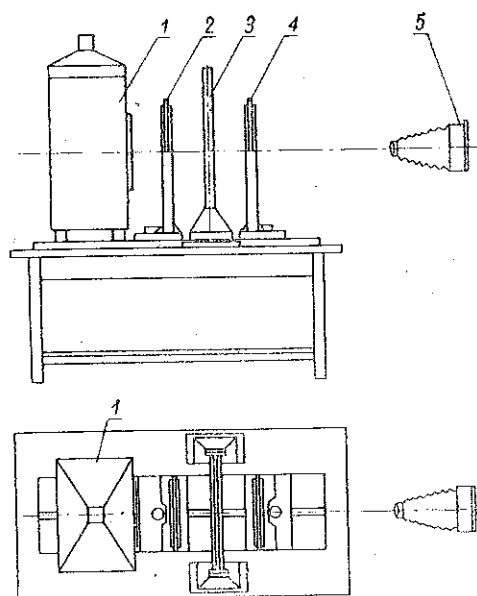
Pewną modyfikację powyższego polaryskopu przedstawia polaryskop o schemacie podanym na rys. 15, opracowany przez autora. Układ ten pozbawiony jest organicznej wady schematu podanego na rys. 8, pole-



Rys. 11. Doświadczalny polaryskop elastoptyczny



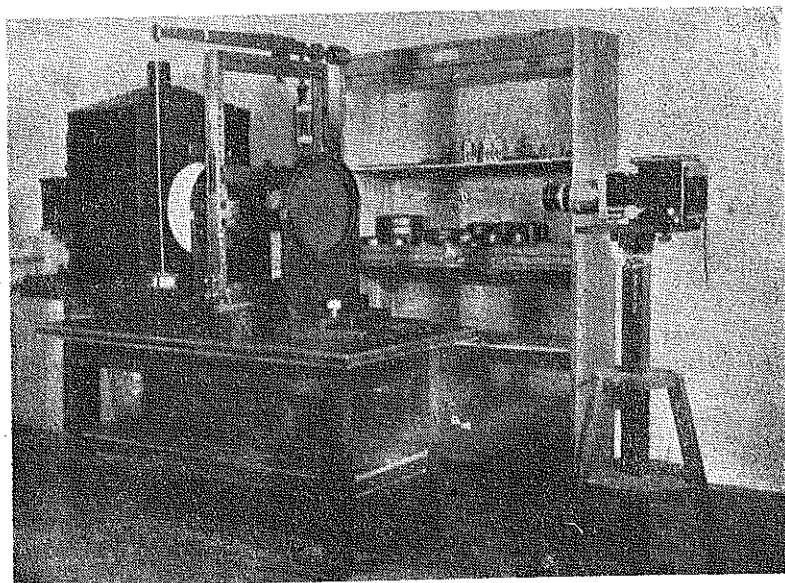
Rys. 12. Mały podręczny polaryskop elastoptyczny o średnicy pola widzenia 40 mm



Rys. 13. Szkic technicznego polaryskopu elastoptycznego; średnica pola widzenia 300 mm

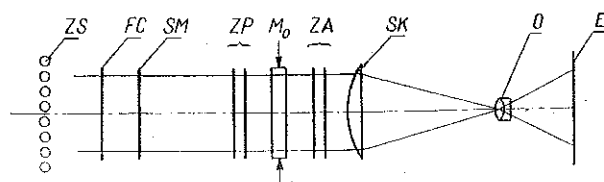
1-laternia z lampami sodowymi i rtęciowymi, 2-zespół polaryzatora, 3-rama obciążająca, 4-zespół analizatora, 5-kamera aparatu fotograficznego

gającej na tym, iż z oddaleniem się układu (aparatu fotograficznego) od osi optycznej maleje ostrość zdjęcia; poza tym posiada on wszystkie zalety polaryskopu o powierzchniowym źródle światła.



Rys. 14. Widok ogólny polaryskopu elastooptycznego typu JP-1

Polaryskopy konstruowane według schematu podanego na rys. 9 należą do najdokładniejszych przyrządów tego typu. Według tego schematu autor opracowuje uniwersalny polaryskop elastooptyczny do badań dokładnych i bardzo dokładnych.



Rys. 15. Schemat półuniwersalnego polaryskopu elastooptycznego, typ JP-1c, średnica pola widzenia 300 mm

ZS-źródło światła (powierzchniowe), lampy sodowe oraz wolframowe lub rżęciowe, SM-szkoło mleczne lub małowe, ZP-zespół polaryzatora, ZA-zespół analizatora, Mo-model badany zamocowany w zespole obciążającym, SK-soczewka kolimacyjna ($d/f \approx 7$), O-obiektyw, E-ekran lub matówka aparatu fotograficznego

Jest rzeczą bardzo pożądaną, a często konieczną — zależnie od typu polaryskopu — aby wyposażony on był w urządzenie pozwalające na przesuwanie modelu w sposób ciągły w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej układu. Umożliwia to dogodną obserwację wszystkich

partii modelu, gdy model jest większy od pola widzenia polaryskopu.

Niezbędnym wyposażeniem polaryskopu elastooptycznego jest kamera fotograficzna z matówką, pożądanym jest również ekran projekcyjny. Pomieszczenie, w którym znajduje się polaryskop, powinno posiadać zaciemnienie.

6. Wykonanie pomiaru

Pomiar przeprowadzamy według zatwierdzonego uprzednio planu możliwie szybko, tak jednak, aby nie odbiło się to niekorzystnie na jego dokładności.

Dokładność pracy stawiamy przy pomiarze na pierwszym planie. Należy zwrócić baczną uwagę na zjawisko pełzania materiału modelu pod obciążeniem i przedsięwziąć środki pozwalające na wyeliminowanie wpływu pełzania na wyniki pomiaru. Pożądane jest, aby była znana temperatura i wilgotność powietrza w pomieszczeniu, w którym odbywa się pomiar. Należy się starać, aby pomiar zakończyć w tym samym dniu, w którym rozpoczęto wykonywanie modelu, chyba że model wykonany jest z materiału nie zmieniającego praktycznie swych własności w czasie, jak szkło lub plexiglas. Pożądane jest dorywcze sprawdzanie w trakcie pomiaru poprawności pracy głównych elementów przyrządu. Przy wykonywaniu zdjęć celowa jest częsta kontrola bezpośrednia (wizualna) obrazu.

Po wykonaniu pomiarów model należy odciążyć, ale nie całkowicie; nieznaczna część obciążenia powinna pozostać, a to w tym celu, aby w razie potrzeby można było odtworzyć łatwo poprzedni stan naprężenia przez proste zwiększenie obciążenia, bez potrzeby powtórnej regulacji.

Wykonane zdjęcia i rysunki kontrolujemy bezpośrednio po pomiarze, przed rozmontowaniem urządzenia. Dopiero po sprawdzeniu poprawności wykonanych rysunków i poprawności wywołanych zdjęć, jeśli zdjęcia i rysunki nie budzą wątpliwości, można zdjąć całkowicie obciążenie. Urządzenia nie należy rozmontowywać aż do opracowania wyników, gdyż zawsze trzeba liczyć się z ewentualną koniecznością wykonania dodatkowych pomiarów dla wyjaśnienia wątpliwości, powstających przy opracowywaniu wyników.

Wobec tego, że pomiary przeprowadza się przeważnie w pomieszczeniu całkowicie lub częściowo zaciemnionym, ze względu na bezpieczeństwo pracy należy dbać o możliwie największy porządek oraz o możliwie największą wygodę i łatwość obsługi przyrządów.

Jeżeli źródłem światła jest lampa wydzielająca dużą ilość ciepła lub lampa rtęciowa o bańce kwarcowej, powodującą tworzenie się ozonu w jej bezpośrednim sąsiedztwie, to pomieszczenie powinno być bezwzględnie wietrzone, tak ze względu na higienę pracy, jak i na konieczność zachowania w trakcie pomiaru stałej temperatury i wilgotności

powietrza, co jest szczególnie ważne przy pomiarach trwających po kilka godzin.

Pożądane jest, aby przedziały czasu pomiędzy chwilą obciążenia modelu a momentami wykonywania zdjęć były możliwie jednakowe oraz dokładnie notowane.

Przy wykonywaniu pomiaru należy — jak już wyżej wspomniano — zwrócić baczną uwagę na zjawisko optycznego pełzania materiału modelu ²⁾, [1], [2], [3], [4], [5], [8], [12], [15].

Skrupulatne notowanie czasu wykonania zdjęcia pozwala na wyeliminowanie wpływu pełzania optycznego za pomocą wykresu pełzania optycznego, zdjętego dla próbki wyciętej z tego samego materiału i badanej w takich samych warunkach, [4]. Sposób ten jest jednak kłopotliwy i niedostatecznie chroni przed możliwymi pomyłkami, poza tym dokładne odtworzenie takich samych warunków sprawia często znaczne trudności. Autor określa wpływ pełzania optycznego za pomocą przyrządu nazwanego kompensatorem optycznym pełzania. Jest to np. pręt pryzmatyczny wycięty z tego samego arkusza plastyku, co model badany, i obciążony siłą rozciągającą. Kompensator optyczny pełzania, zwany krótko kompensatorem pełzania, zostaje obciążony jednocześnie z modelem w ten sposób, iż wartość siły obciążającej kompensator jest w każdej chwili proporcjonalna do wartości obciążenia modelu. W ten sposób zrealizowana jest identyczność warunków obciążenia modelu i kompensatora pełzania.

Powyższe realizuje się praktycznie w ten sposób, iż kompensator pełzania stanowi część urządzenia obciążającego lub też część modelu. Najprostszym kompensatorem pełzania jest pręt pryzmatyczny; użyty do tego celu może być jednak każdy model, w którym rozkład i wartość naprężeń można określić doświadczalnie bez trudności, np. okrągła tarcza ściskana dwiema osiowymi siłami. Rysunek 16 przedstawia rozmaite możliwości rozwiązania kompensatorów pełzania. Posługując się kompensatorem pełzania, przy wykonywaniu każdego zdjęcia izochrom kolejnej partii modelu lub całego modelu pod określonym obciążeniem, wykonuje się jednocześnie zdjęcie kompensatora pełzania.

Na podstawie tego zdjęcia, znając wartość siły obciążającej, a stąd wartość naprężenia w pewnym punkcie modelu, oraz rząd izochromy przechodzącej przez ten punkt, określa się każdorazowo wartość stałej

²⁾ Zjawisko pełzania optycznego polega na tym, że przy stałej wartości obciążenia, a więc i naprężenia, rząd izochromy przechodzącej przez dowolny punkt modelu, nie będący punktem osobliwym, stale wzrasta. Rząd izochromy przechodzącej przez dany punkt jest więc nie tylko funkcją stałej modelowej oraz wartości różnicy naprężeń głównych, ale i czasu działania obciążenia oraz przebiegu wartości obciążenia w czasie.

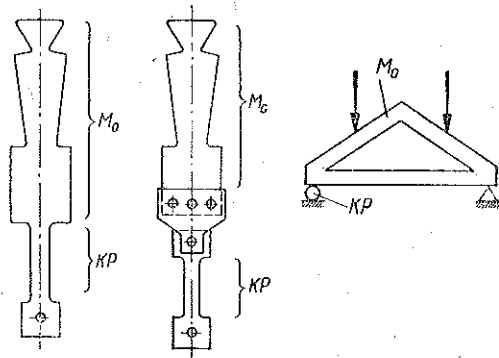
modelowej, odpowiadającej danej chwili wykonania zdjęć izochrom w modelu. Wartość stałej modelowej — jak wiadomo — maleje z upływem czasu działania obciążenia.

Oczywiście, powyżej opisana metoda wykonywania pomiaru przy użyciu jednego kompensatora optycznego pełzania daje poprawne wyniki, gdy pełzanie optyczne materiału jest z dostateczną dokładnością wprost proporcjonalne do wartości różnicy naprężeń głównych. Szczęśliwym trafem żywice fenolowe stosowane na modele elastoptyczne posiadają zasadniczo tę własność, [3], [5]. Natomiast stosunkowo łatwo dostępny celuloid pełźnie optycznie pod obciążeniem w sposób znacznie bardziej zawiły, dlatego pomiary na modelach celuloidowych obciążone są zwykle znacznym błędem; błąd ten można zmniejszyć stosując na modele celuloid kilkuletni, który pełźnie w znacznie mniejszym stopniu.

Opisana metoda pomiaru przy użyciu kompensatora pełzania jest metodą prostą i dokładną.

Istotnym zagadnieniem, wpływającym w zasadniczy sposób na dokładność wyników pomiaru, jest dobór odpowiedniej wartości obciążeń. Dobór ten nie zawsze jest łatwy. Uwzględnić przy nim należy: własności wytrzymałościowe materiału modelu, jak moduł sprężystości, umowna granica sprężystości, pełzanie mechaniczne i optyczne, następnie stałą materiałową, orientacyjną wartość naprężeń własnych modelu, rodzaj i sposób przyłożenia obciążenia oraz kształt geometryczny modelu.

Każdy z wymienionych czynników przemawia za lub przeciw zwiększaniu wartości obciążeń. Gdy wartość obciążenia jest stosunkowo duża, to otrzymujemy izochromy wyższych rzędów, co ułatwia odczytywanie zapisów oraz zwiększa ich dokładność, zwłaszcza iż jednocześnie ze wzrostem naprężeń wywołanych obciążeniem maleje procentowo wartość naprężeń własnych, które zniekształcają odczyty. Z powyższych względów jest rzeczą celową stosowanie możliwie wysokich wartości obciążeń modeli. Z drugiej jednak strony zwiększenie wartości obciążenia powoduje wzrost odkształceń modelu, a więc i zmianę jego kształtu geometrycznego, odwrotnie proporcjonalną do modułu sprężystości materiału. Niedogodność tę można w pewnym sensie skompensować wykonując model tak, aby dopiero po jego obciążeniu i odkształceniu posiadał przyjęty kształt geometryczny.



Rys. 16. Przykład rozwiązań kompensatora optycznego pełzania
MO-badany model, KP-kompensator pełzania

W przypadku działania na model skupionych sił obciążających najbardziej niemiłym efektem wysokiej wartości obciążeń są — poza większym pełzaniem — powstające odkształcenia plastyczne materiału w bezpośrednim sąsiedztwie działania skupionych sił. Odkształcenia te wpływają zakłócająco na przebieg izochrom na ogół jedynie w najbliższym sąsiedztwie obszarów odkształconych plastycznie, zgodnie z zasadą *S a i n t - V e n a n t a*. W niektórych jednak przypadkach zakłócenia te mogą być znaczniejsze i sięgać dalej od punktów przyłożenia sił, zależnie od kształtu geometrycznego modelu. Poza tym w wyniku odkształceń plastycznych, spowodowanych działaniem siły skupionej, powierzchnie czołowe odkształconej plastycznie partii modelu zakrzywiają się odchylając bieg promieni świetlnych, w wyniku czego dana partia modelu — przy prześwietlaniu go równoległą wiązką świetlną — pozostaje ciemna na obrazie modelu. Jest to tak zwany efekt soczewki, który uniemożliwia odczytanie przebiegu izochrom w partii silnie odkształconej. Zagadnienie to omówił szerzej *B o k s z t i e j n*, [6].

Jeśli więc istotne jest określenie przebiegu izochrom oraz izoklin w okolicach punktów przyłożenia sił skupionych, to należy badania tych okolic przeprowadzić przed badaniem całego modelu przy możliwie niskich wartościach sił obciążających, a dopiero po wykonaniu tego zabiegu model obciążyć w sposób przepisany, godząc się z nieuniknionym powstaniem odkształceń plastycznych. Efekt soczewki można wyeliminować w znacznym stopniu dokonując zdjęć w świetle rozproszonym.

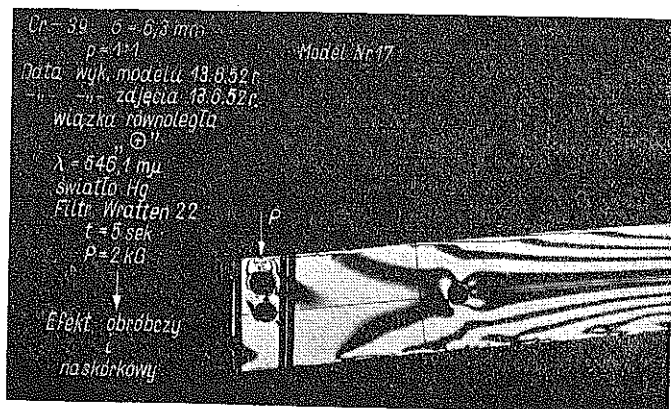
Dla zmniejszenia odkształceń plastycznych modeli wykonanych z żywicy fenolowych, które są najczęściej stosowane na modele elastooptyczne, wygrzewamy uprzednio arkusz plastyku, z którego ma zostać wykonany model, w określonej temperaturze w ciągu dobranego okresu czasu, podwyższając w ten sposób jego moduł sprężystości oraz umowną granicę sprężystości (dopuszczalną wartość naprężenia), [2], [8]. Wygrzewanie takie zwiemy utwardzaniem plastyku.

Biorąc pod uwagę podane wyżej względy, decydujące o wartości obciążenia modelu, należy wybrać rozsądny kompromis pomiędzy względami przemawiającymi za i przeciw zwiększaniu wartości obciążenia, uwzględniając warunki pomiaru, własności materiału modelu oraz żądaną dokładność pomiaru.

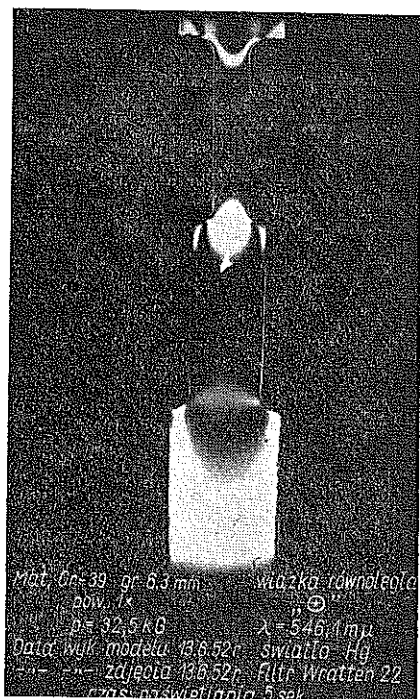
7. Opracowanie wyników pomiaru

Wyniki pomiaru czy to w formie rysunków odręcznych, wykonanych na arkuszu rozpiętym na ekranie, czy to pod postacią zdjęć fotograficznych, należy opracować tak, aby mogły służyć za podstawę do bezpośredniej analizy rezultatów lub do dalszego analitycznego opracowania.

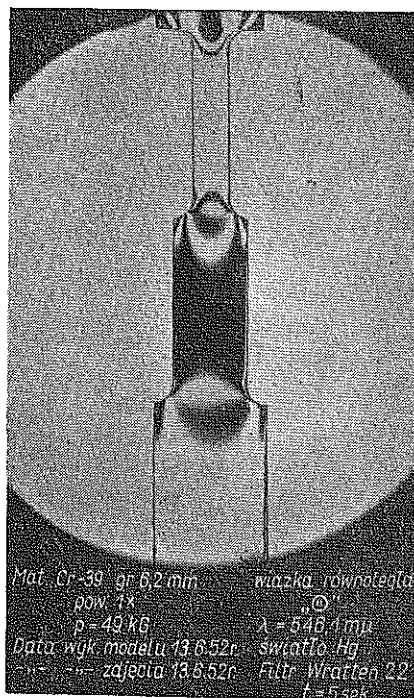
Opracowanie wyników pomiaru obejmuje opracowanie samych zdjęć oraz wykonanie rysunków zbiorczych izoklin i izochrom. Opracowanie



Rys. 17. Przykład opisanie zdjęcia pręta zginanego



Rys. 18. Przykład opisanie zdjęcia pręta rozciąganego



Rys. 19. Przykład opisanie zdjęcia pręta rozciąganego

zdjęcia polega na jego poprawnym skopiowaniu oraz na dołączeniu wszystkich ważnych danych technicznych, jak materiał modelu, jego

grubość, wartość siły obciążającej, data wykonania modelu, data wykonania zdjęcia, czas naświetlania, powiększenie zdjęcia, rodzaj wiązki, jaką prześwietlany jest model, rodzaj polaryzacji światła (najwygodniej symbolicznie), rodzaj źródła światła, filtr barwny, długość fali światła. Często celowe jest zarejestrowanie powyższych danych bezpośrednio na zdjęciu

(na negatywie). Rysunki 17-19 przedstawiają takie — jak mówimy — opisane zdjęcia zginanego i rozciąganego pręta. Rysunki i zdjęcia izoklin oraz izochrom opracowuje się korygując ewentualne błędy oraz uzupełniając ewentualne luki w oparciu o zależności dostarczone przez teorię sprężystości. Po opracowaniu rysunków i zdjęć sporządza się — w odpowiedniej skali — rysunek rodziny izoklin z naniesionymi parametrami oraz rysunek (lub rysunki) izochrom z oznaczonymi rzędami izochrom oraz z oznaczonymi punktami osobliwymi.

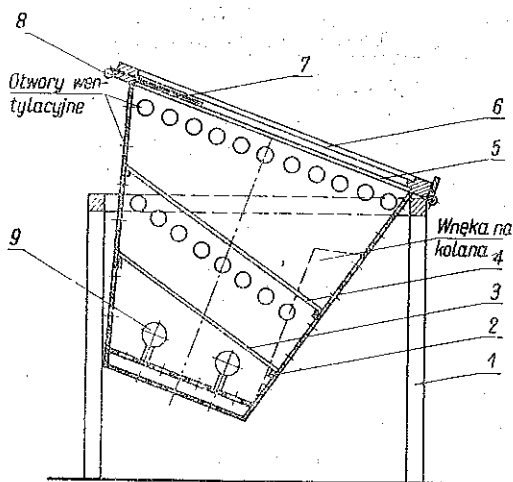
Rysunki izoklin i izochrom należy wykonywać możliwie dokładnie i starannie, w skali nie za małej dobranej do oczekiwanej dokładności pomiaru; od dokładności ich wykonania zależy w zasadniczym stopniu dokładność ostatecznych wyników badań.

Przykłady opracowanych rysunków zbiorczych izoklin i izochrom podane są na rys 20a i 20b.

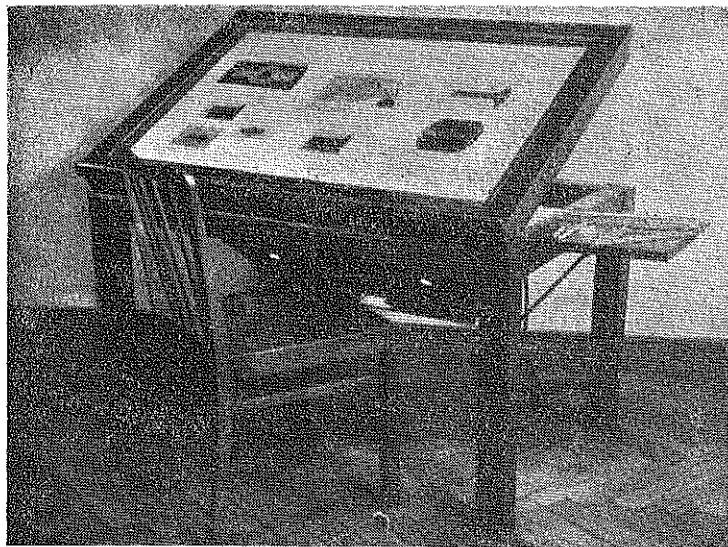
Rys. 20. Przykład rysunku zbiorczego
a-izokliny (tarcza ściskana), b-izochromy (pręt zginany siłą skupioną)

W pracach bardziej dokładnych celowe jest stosowanie wyłącznie rejestracji fotograficznej. Izokliny oraz izochromy zarejestrowane na zdjęciach autor przenosi na rysunek zbiorczy za pomocą specjalnie zbudowanego do tego celu przyrządu, zwanego kopiarką. Schemat kopiarki podany jest na rys. 21. Rysunek 22 przedstawia zdjęcie kopiarki w trak-

cie pracy. Kalkę kreślarską lub papier, na którym wykonuje się rysunek zbiorczy, przypina się do płyty kopiarki za pomocą plastra; pod kalką umieszcza się kolejno zdjęcia, z których kopiuje się linie charakterystyczne. Ze względu na wygodę pracy i na dokładność kreślenia kopiuje się często bezpośrednio z negatywów otrzymanych przy pomiarach. Ponieważ izokliny i izochromy zarejestrowane na negatywach mają postać białych linii, wobec tego rysujący widzi stale wyraźnie koniec ołówka, którym kreśli; ponieważ dalej izokliny i izochromy posiadają często kilkumilimetrową szerokość, więc to wszystko ułatwia poprawne wykreślenie, zmniejsza błędy i nie zmusza do wyęźżania wzroku.



Rys. 21. Schemat kopiarki
 1-podstawa, 2-skrzynia, 3-szyba izolacyjna dolna, 4-szyba izolacyjna górna, 5-szkło mleczne, 6-płyta, 7-zasłona przesuwna, 8-walek roletowy zasłony, 9-lampy



Rys. 22. Zdjęcie kopiarki w czasie pracy, typ JP-2

Kopiarka posiada trzy stopnie jasności zależnie od ilości włączonych lamp. Najmniej męcząca dla wzroku jest praca na kopiarce przy pełnym

oświetleniu pomieszczenia lub nawet przy dodatkowym oświetleniu płyty kopiarki od góry, albo też w zaciemnionym pomieszczeniu pod warunkiem, iż nie zakryta przez kopiowane zdjęcie powierzchnia płyty kopiarki zostanie starannie przysłonięta czarnym papierem.

Do rozróżnienia drobnych szczegółów na zdjęciach niezbędne są lupy. Bez lupy często w ogóle nie można określić przebiegu oraz rzędu izochrom w obszarach koncentracji naprężeń. Lupy trzy- i pięciokrotne oraz dziesięciokrotna lupka z podziałką produkcji Polskich Zakładów Optycznych oddają dobre usługi. Przy odczytywaniu trudniejszych zdjęć, o znacznym zagęszczeniu izochrom, dobre usługi oddaje również komparator A b b e g o, produkcji Z e i s s a, lub mikroskop warsztatowy z ekranem.

8. Analiza wyników pomiaru

Analiza wyników pomiaru ma na celu przede wszystkim ustalenie, czy opracowany materiał doświadczalny jest wystarczający do uzyskania pożądaných wyników tak pod względem ilości materiału, jak i jego dokładności.

Jednocześnie w trakcie przeprowadzania analizy wyników pomiaru przeprowadza się ich ostateczne sprawdzenie dla wyeliminowania nie zauważonych poprzednio błędów.

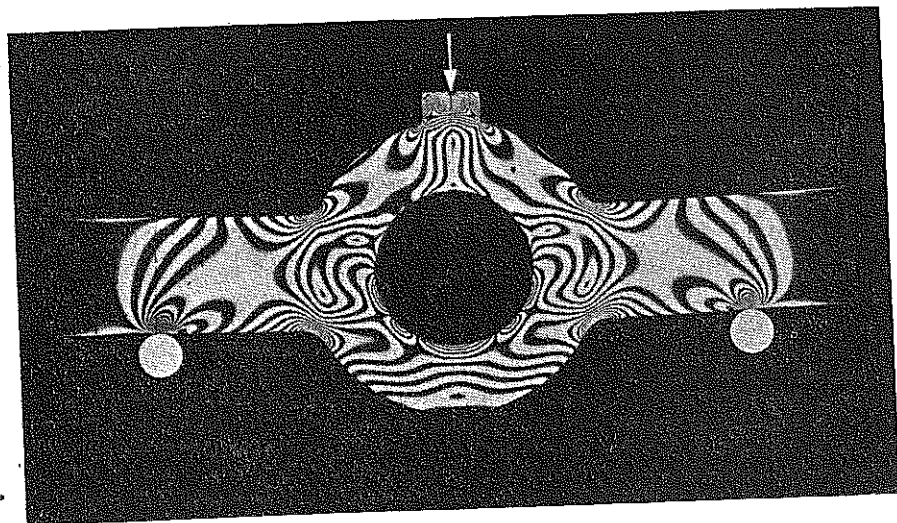
9. Opracowanie wyników badania

W większości zwykłych badań elastooptycznych jest rzeczą wystarczającą wykreślenie trajektorii naprężeń głównych na podstawie rodzin izoklin oraz wyznaczenie rozkładu i wartości naprężeń na nie obciążonych krawędziach. W razie potrzeby wyznaczamy — jedną z metod analitycznych lub analityczno-graficznych — wartości naprężeń w określonych przekrojach lub w określonych punktach badanego modelu. Często sporządza się wykres współczynnika kształtu przyjmując odpowiednie założenia co do sposobu obliczania naprężeń nominalnych. Celowe jest ujęcie wyników badania w zwięzłe wnioski.

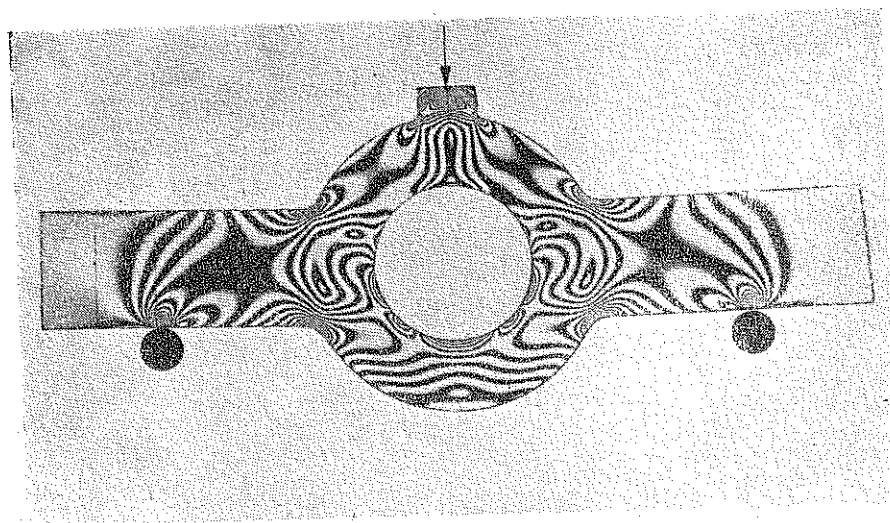
10. Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie z badania powinno zawierać wszystkie istotne elementy badania, dane wyjściowe, obliczenia, krótki opis badania, wszystkie tabele przeliczeniowe, wykresy, najważniejsze zdjęcia elastooptyczne itp. Powinno ono stanowić zwięzłą i zamkniętą logiczną całość.

Wyżej podane uwagi dotyczące wykonania pomiaru, opracowania wyników pomiaru oraz opracowania wyników badania ilustrowane są rysunkiem zbiorczym 23-25.



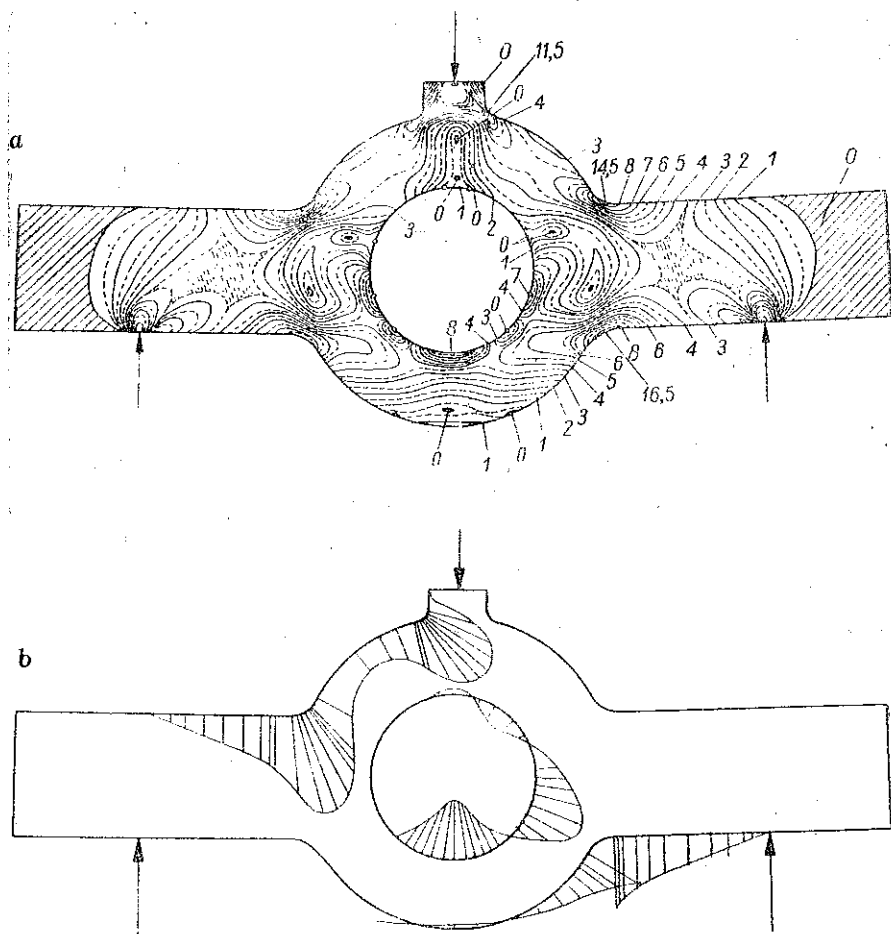
Rys. 23. Przykład wyznaczania naprężeń krawędziowych — zdjęcie izochrom na ciemnym polu widzenia



Rys. 24. Przykład wyznaczania naprężeń krawędziowych — zdjęcie izochrom na jasnym polu widzenia

Podawanie w sprawozdaniu pełnego rysunku izochrom, który nie zawsze jest konieczny do wyznaczenia naprężeń brzegowych, jest pożądane,

gdyż izochromy są — jak wiadomo — liniami jednakowych największych naprężeń ścinających, a więc ich układ i przebieg pozwala na zorientowanie się w rozkładzie naprężeń we wnętrzu elementu.



Rys. 25. Izochromy

a-rysunek izochrom opracowany na podstawie zdjęć z rysunków 23 i 24 oraz skorygowany
 b-wykres naprężeń krawędziowych (brzegowych) opracowany na podstawie rysunku izochrom z rys. 25a

11. Ocena dokładności wyników

Ocenę dokładności wyników badania podzielić można na ocenę dokładności wyników pomiaru i ocenę dokładności opracowania wyników.

Przez dokładność wyników pomiaru rozumiemy dokładność bezpośrednich wyników pomiaru, uzupełnionych i skorygowanych na podsta-

wie zależności, dostarczanych przez teorię sprężystości. Odgrywa tu więc rolę dokładność przebiegu izoklin (odchylenia w stopniach), dokładność przebiegu izochrom (błąd względny równy stosunkowi odchylenia rzędu izochromy do jego wartości), dokładność pomiarów kompensacyjnych (błąd względny) itd.

W przeciętnych badaniach technicznych wykonywanych na przyrządzie opartym na układzie, który podany jest na rys. 10, błąd w określaniu przebiegu izoklin (odchylenie w stopniach) nie powinien przekraczać $\pm 1^\circ$, zaś błąd w określaniu przebiegu izochromy (względne odchylenie rzędu izochromy) nie powinien przekraczać $\pm 5\%$, z tym iż przy starannej pracy błąd ten zmniejszyć można do $\pm 3\%$. Powyższe służyć może dla obszarów dostatecznie oddalonych od punktów przyłożenia sił.

Dokładność pracy można ocenić porównując otrzymany doświadczalnie przebieg izoklin i izochrom z ich przebiegiem teoretycznym w ciałach, w których przebieg teoretyczny daje się łatwo wyznaczyć; rzecz dotyczy, na przykład, tarczy okrągłej ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, pierścienia kołowego ściskanego wzdłuż średnicy, klina ściskanego osiowo albo zginanego itp. Dokładność uzyskana w takich badaniach będzie miała miejsce zwykle i w innych podobnych przypadkach, oczywiście przy takich samych warunkach doświadczeń.

Dokładność ostatecznych wyników badania zależy od dokładności wyników pomiaru i dokładności opracowania wyników badania. Ta ostatnia zależy w pierwszym rzędzie od tego, co rozumiemy jako ostateczny wynik badania i jakimi drogami go uzyskujemy. Jeśli celem badania jest tylko otrzymanie układu trajektorii naprężeń głównych, trajektorii największych naprężeń ścinających, linii jednakowej wartości największych naprężeń ścinających oraz wartości naprężeń na nieobciążonych krawędziach, to dokładność ostatecznych wyników badania, otrzymanych na podstawie układu izoklin i izochrom, będzie się zwykle tylko nieznacznie różniła od dokładności wyników pomiaru. Dojdą zasadniczo tylko błędy rysunkowe, które można w znacznym stopniu usunąć. Jeśli natomiast celem pomiaru jest wyznaczenie pola naprężeń jedynie na podstawie znajomości układu izoklin i izochrom za pomocą jednej z metod graficzno-analitycznych, to ostateczny błąd może się znacznie zwiększyć. W takim przypadku należy tak dobrać technikę opracowywania ostatecznych wyników, aby powstające przy obliczeniach błędy były możliwie małe. Gdy prawdopodobieństwo powstania znacznych błędów jest zbyt duże, to należy korzystać z jednej z metod dopełniających, na przykład z metody analogii elektrycznej lub metody pomiaru odkształceń. W ogólności celowe jest stosowanie częstej kontroli wyników za pomocą innych metod pomiarowych i obliczeniowych.

III. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ WYNIKÓW. ŹRÓDŁA BŁĘDÓW

Przy przeprowadzaniu badań elastooptycznych należy baczyć, by opisane poniżej główne źródła błędów zostały wyeliminowane całkowicie lub, co najmniej, zmniejszone do rozsądnych granic, zależnych od typu badania.

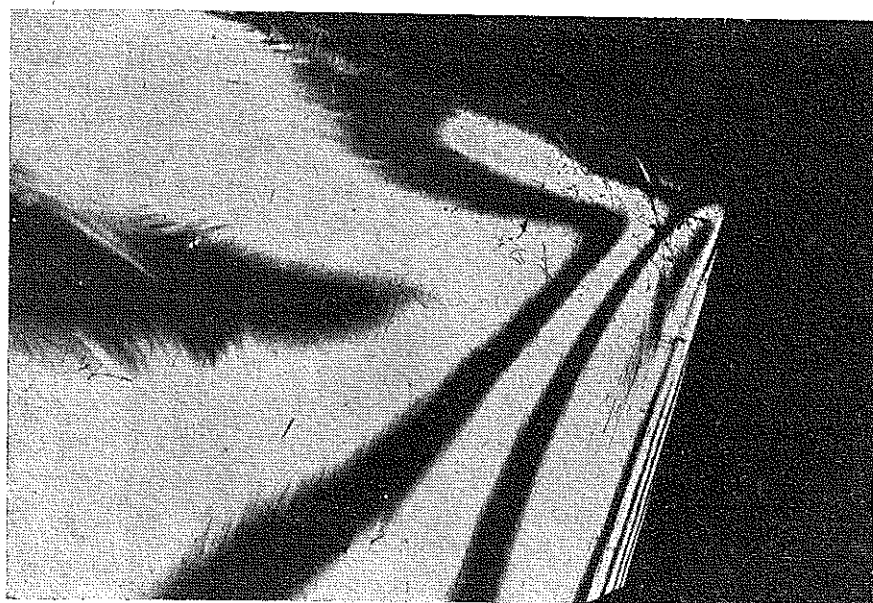
Rozpatrując poszczególne etapy prac laboratoryjnych, związanych z przeprowadzanymi badaniami, należy zawsze mieć na uwadze możliwe błędy i oceniać ich wpływ na jakość i dokładność wyników badania. Omówione poprzednio metody pracy laboratoryjnej należy oceniać również i pod tym kątem widzenia.

1. Wpływ własności materiałów na modele

Oceniając zalety i wady różnych materiałów na modele elastooptyczne oraz decydując o stosowanej technice wykonywania pomiarów, należy zwracać uwagę nie tylko na wyznaczone na podstawie doraźnej próby wartości wielkości mechanicznych, jak moduł sprężystości, liczba Poissona, wytrzymałość doraźna, ale również na specyficzne własności plastyków, jak wyraźna zależność własności mechanicznych od temperatury i wilgotności powietrza oraz od czasu badania, wysoka wartość pełzania oraz wysoka wartość relaksacji (wiotczenia) już w zakresie temperatur pokojowych. Omawianie tych zagadnień wykracza poza ramy niniejszej pracy, są one szczegółowo podane w literaturze, [1], [2], [4], [5], [12], [14], [17]; podkreślić jednak należy, iż nieuwzględnienie tych specyficznych własności plastyków może stać się przyczyną poważnych błędów pomiarowych. Na tym miejscu omówimy szerzej jedynie zagadnienie często występującej anizotropii optycznej plastyków stosowanych na modele elastooptyczne.

Z plastyków najczęściej stosowanych na modele elastooptyczne tylko niektóre nie wykazują zauważalnej anizotropii optycznej — przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowej — zarówno we wnętrzu płyty, jak i na jej krawędziach. Do takich plastyków należy dobrej jakości plexiglas oraz żywica styrenowa CR 39. Najczęściej stosowane w elastooptyce żywice fenolowe wykazują na ogół znaczną anizotropię optyczną i to zarówno przy prześwietlaniu prostopadłym, jak i równoległym do powierzchni czołowej arkusza plastyku. Anizotropia ta polega na efekcie dwójłomności oraz na obecności smug wskazujących na lokalne ostre zmiany wartości współczynnika załamania światła (efekt *Schlieren*).

Zdjęcie na rys. 26, przedstawiające nieobciążony arkusz grubości 8 mm catalinu 800, należącego do żywic fenolowych, wykonane na ciemnym tle, ilustruje oba wymienione rodzaje anizotropii — dwójłomność przejawiającą się obecnością izochrom oraz smużenie (*Schlieren*). O ile smugi zasadniczo nie dają się eliminować, o tyle dwójłomność można znacznie zredukować poddając arkusz plastyku odpowiedniej obróbce cieplnej, zwanej wygrzewaniem.



Rys. 26. Zdjęcie elastooptyczne nieobciążonego arkusza żywicy fenolowej catalin 800, grubość 8 mm, nieobrabiany cieplnie; wiek arkusza ok. 1,5 roku; widoczna wyraźna anizotropia optyczna — izochromy oraz smugi (*Schlieren*)

Efekt dwójłomności własnej arkusza plastyku, przedstawionego na rys. 26, jest efektem bardzo znacznym; zwykle anizotropia optyczna, uwidaczniająca się przy prześwietlaniu nieobciążonego modelu w polaryskopie, prostopadle do jego powierzchni czołowych, występuje w postaci jasnych lub — przy pracy światłem białym — barwnych plam. Anizotropia powyższa jest wynikiem obecności niejednorodnych naprężeń własnych modelu w przekrojach równoległych do jego powierzchni czołowych.

Również przy prześwietlaniu niektórych plastyków oraz plastyków nieodpowiednio przechowywanych, równoległe do powierzchni czołowych arkusza często można zauważyć znaczną anizotropię optyczną, [2], [13].

Anizotropia optyczna, obserwowana przy prześwietlaniu wyciętego z arkusza (np. żywicy fenolowej) pręta pryzmatycznego, równoległe do

powierzchni czołowych arkusza, charakteryzuje się zwykle kilku lub kilkunastu izochromami przebiegającymi równolegle do pierwotnych powierzchni czołowych arkusza plastyku. Anizotropia tego rodzaju wskazuje, według najprostszej interpretacji tego zjawiska, na obecność mniej lub więcej jednorodnego stanu naprężenia w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny środkowej arkusza z tym, iż wartość tych naprężeń w każdej z płaszczyzn jest inna. Gdy płyta plastyku nie wykazuje anizotropii optycznej przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowych, a wykazuje ją przy prześwietlaniu równoległym, wówczas w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny środkowej płyty panują jednorodne pola naprężeń, różne co do wartości w każdej płaszczyźnie, [13], względnie zachodzi zjawisko dwójłomności orientacyjnej, wywołanej procesem produkcyjnym. Zjawisko to jest typowe dla plastyku CR 39, a zachodzi często w arkuszach plexiglasu nieodpowiednio przechowywanych.

Przeważnie oba efekty dwójłomności (przy prześwietlaniu prostopadłym oraz równoległym do powierzchni czołowej) występują jednocześnie i wpływają wzajemnie na siebie.

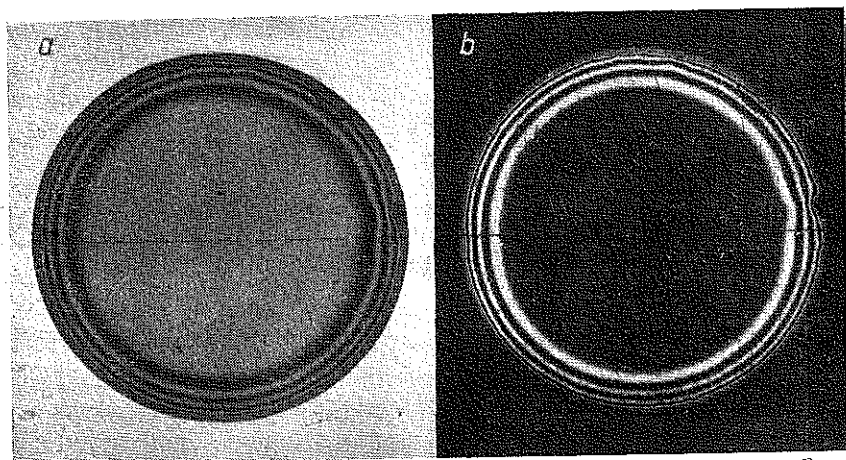
Opisaną anizotropię optyczną materiału na modele elastoptyczne usuwamy przez odpowiednie wygrzewanie plastyku. Przy przeciętnych badaniach elastoptycznych dążymy do takiego zredukowania dwójłomności w arkuszu plastyku na modele, aby, jak już wyżej podano, efekt elastoptyczny — w partiach nie leżących przy krawędzi płyty — nie przekraczał przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowych około 0,1 m., przy prześwietlaniu równoległym do powierzchni czołowych około 1,0 m.

Opisany wyżej efekt elastoptyczny nie jest niezmienny w czasie. Obserwując płytę, np. żywicy fenolowej prześwietlaną prostopadle do jej powierzchni czołowej, zauważyć można narastanie efektu elastoptycznego od krawędzi płyty z upływem czasu (patrz zdjęcie na rys. 27). Tarcza, przedstawiona na tym rysunku, bezpośrednio po wykonaniu nie wykazała żadnego efektu elastoptycznego, ale po upływie około półtora roku narastający systematycznie efekt elastoptyczny osiągnął pożądaną wartość.

Powstawanie i narastanie efektu zilustrowanego zdjęciami na rys. 27 zauważono na krawędziach arkuszy niektórych rodzajów plastyków, prześwietlanych prostopadle do ich powierzchni czołowej; efekt ten narastał szczególnie szybko na świeżo obrobionych krawędziach. Z powyższego powodu efekt ten nazwano efektem krawędziowym lub krawędziowo-czasowym (*Randeffekt*, *time-edge effect*, *time-stress effect* itp.). Szczególnie szybko narasta opisany efekt na świeżo obrobionych krawędziach modelu wykonanego z nieutwardzanej żywicy fenolowej; narastanie efektu wskazuje na powstawanie naprężeń własnych na świe-

zo obrobionej krawędzi modelu, wzrastających z upływem czasu. Wobec tego jednak, iż narastanie efektu daje się zauważyć przy wszystkich powierzchniach modelu, a nie tylko przy świeżo obrobionych, to wydaje się rzeczą słusniejszą nazwać ten efekt efektem «naskórkowym» i tak go w pracach elastoptycznych nazywamy. Aby odróżnić efekt naskórkowy ogólny, narastający na wszystkich powierzchniach płyty plastyku, od efektu naskórkowego, narastającego przy świeżo obrobionych krawędziach (bardziej złożonego), zwiemy często ten ostatni efektem naskórkowym na krawędzi.

Efekt naskórkowy w żywicach fenolowych wywołany jest zmianą zawartości wody w naskórkowych oraz głębszych partiach modelu oraz — być może — pewnymi procesami chemicznymi zachodzącymi na i pod powierzchnią modelu. Zmiany te powodują powstawanie naprężeń, które z kolei wywołują efekt elastoptyczny.

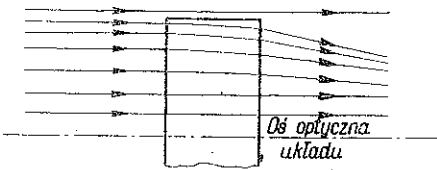


Rys. 27. Zdjęcie elastoptyczne nieobciążonej okrągłej tarczy tarcza wykonana z utwardzonego catalinu 800, gr 5,6 mm; zdjęcie wykonano w równoległej wiązce światła ok. 1,5 roku po wykonaniu modelu; widoczny efekt naskórkowy przy krawędzi tarczy w postaci kilku rzędów izochrom; *a*-zdjęcie na tle jasnym, *b*-zdjęcie na tle ciemnym

Należy jednak zaznaczyć, że — w przeciwieństwie do dotychczas ogólnie przyjętego poglądu, [2], [5], [13], [16], — efektu naskórkowego, przynajmniej w żywicach analogicznych do żywic fenolowych, nie należy, zdaniem naszym, kojarzyć bezpośrednio z obecnością naprężeń własnych, zdefiniowanych w popularnym znaczeniu tego słowa; zjawisko jest bardziej zawile. Zagadnienie to omówione zostało niżej (rys. 30).

Poza opisaną anizotropią optyczną plastyków stosowanych na modele elastoptyczne, związaną z obecnością naprężeń a tym samym z dwójłomnością wymuszoną (przynajmniej w pierwszej fazie tego zjawiska),

zauważyć można wtórną anizotropię optyczną, polegającą na pewnych zmianach wartości współczynnika załamania światła. Zjawisko to — zauważone przez autora w trakcie obserwacji efektu naskórkowego — występujące łącznie z efektem naskórkowym jest źródłem dodatkowych błędów w pomiarach elastoptycznych. Polega ono na tym, iż promienie równoległej wiązki świetlnej, przechodzące przez partie krawędziowe modelu, wykazujące efekt naskórkowy, zostają odchylone w kierunku do wnętrza modelu podobnie jak promienie w soczewce, partie krawędziowe modelu o przekroju prostokątnym działają bowiem w takim przypadku jak soczewka. Obrazuje to rys. 28. W wyniku tego zjawiska, które nazwiemy efektem «naskórkowo-soczewkowym», krawędzie modelu, wyka-



Rys. 28. Bieg równoległej wiązki promieni świetlnych przez partie przykrawędziową modelu, wykazującego efekt naskórkowy na krawędzi

ujętego analitycznie przez B o k s z t i e j n a, [6], — odchylenia biegu promienia przechodzącego przez partie modelu o różnych wartościach naprężeń. Zjawisko to było zaobserwowane i wyjaśniane przez A. K u s k e, [5], w tym sensie, iż odchylenie biegu promieni świetlnych wywołane jest wtórnym skutkiem efektu naskórkowego, polegającym na zakrzywieniu się powierzchni czołowych modelu w sąsiedztwie krawędzi oraz na zakrzywieniu się samej powierzchni krawędziowej. Słuszny jest pogląd, iż zakrzywienie powierzchni modelu wywoła również w efekcie pogrubienie linii konturowej na obrazie modelu, jednak — jak to wynika z obserwacji autora — efekt ten występuje równocześnie z powstającym efektem naskórkowym, i jest wyraźniej widoczny już wówczas, gdy zakrzywienia przykrawędziowych partii powierzchni czołowych modelu nie można jeszcze odkryć za pomocą typowych mechanicznych przyrządów do pomiaru kątów.

Ogólnie przyjąć można, iż na pojawianie się efektu naskórkowego zasadniczy wpływ wywiera zmiana zawartości wody w plastyku. Zmiana ta nosić może różny charakter. W żywicach fenolowych będących, jak wiadomo, polikondensatami, kondensacja następuje wraz z wydzielaniem cząsteczki wody. W trakcie procesu kondensacji w nieutwardzonej płycie żywicy fenolowej powstałe w materiale cząsteczki wody wędrują

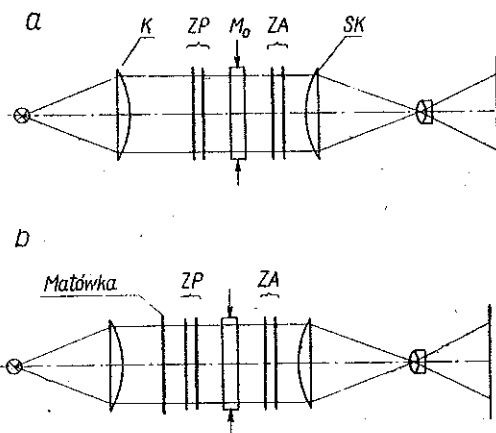
zującego efekt naskórkowy i prześwietlanego równoległą wiązką światła, odziorowują się na zdjęciu znacznie nieraz pogrubione. Również i to zjawisko nie jest zupełnie jasne; na przykład występuje ono bardzo słabo lub nie występuje wcale na krawędziach modeli wykonanych z utwardzonej żywicy fenolowej.

Wydaje się, iż wspomniane zjawisko nosi podobny charakter do zjawiska —

ku powierzchni; w rezultacie następują zmiany w zawartości wody różnych partii modelu. Na przebieg procesu posiada zasadniczy wpływ temperatura i wilgotność otoczenia. Plastyki będące polimerami, jak żywice styrenowe (CR 39) lub żywice metakrylowe (plexiglas) wykazują efekt naskórkowy jako wynik zmiany wilgotności pomieszczenia, a więc jako wynik zakłócenia równowagi między zawartością wilgoci w plastyku i wilgotnością otoczenia. Nieodpowiednio przechowywany plexiglas (w zbyt wilgotnym pomieszczeniu) nie nadaje się bezpośrednio na modele elastoptyczne, gdyż narastający w ciągu kilkunastu minut po wykonaniu modelu efekt naskórkowy na krawędzi deformuje zdecydowanie obraz izoklin. Plexiglas nieodpowiednio przechowywany nadaje się do pracy dopiero po kilkumiesięcznym magazynowaniu w normalnej wilgotności i temperaturze powietrza.

Opisane efekty optyczne ilustrujemy zdjęciami podanymi na rysunkach 29-31.

Na rysunku 30 umieszczony jest zespół zdjęć nieobciążonej beleczki, dokonywanych w różnych warunkach optycznych. Beleczka została wycięta z nieutwardzonego arkusza żywicy fenolowej o grubości 3,8 mm; arkusz ten po otrzymaniu od dostawcy przechowywany był w pomieszczeniu laboratoryjnym w ciągu około półtora roku. Beleczkę prześwietlano światłem zielonym, naturalnym oraz kołowo spolaryzowanym, tworzącym równoległą oraz rozproszoną wiązkę; beleczka była prześwietlona prostopadłe oraz równoległe do powierzchni, które stanowiły część powierzchni czołowych arkusza plastyku. Rysunki 29 przedstawiają układy optyczne polaryskopu, za pomocą których otrzymano zdjęcia podane na rys. 30; na



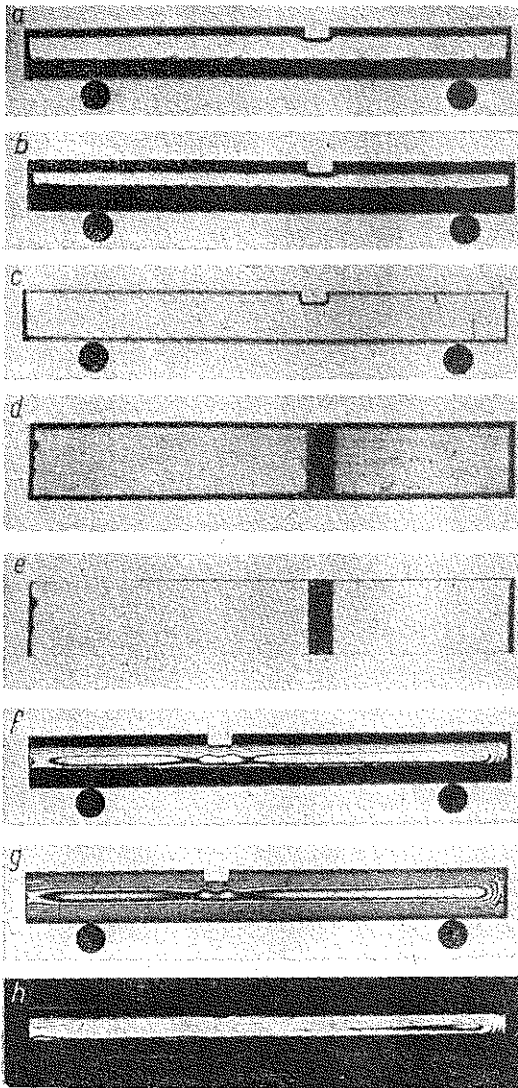
Rys. 29. Układy optyczne polaryskopu, za pomocą których wykonano zdjęcie podane na rys. 24

a-układ o równoległej wiązce światła, b-układ o rozproszonej wiązce światła

rys. 29a podano układ pracujący na równoległej wiązce świetlnej, zaś na rys. 29b na rozproszonej. Widoczny jest efekt naskórkowy znacznej wielkości, powstający na nieobrabianych powierzchniach (dłuższa krawędź beleczki) w ciągu dłuższego czasu.

Elastoptyczny efekt naskórkowy, obserwowany na zdjęciach dokonanych przy równoległej wiązce świetlnej, jest wyraźnie zaciemniony na skutek niejednorodnej zmiany wartości współczynnika załamania

światła; zmiana ta jest również wynikiem efektu naskórkowego, jak o tym już wspomnieliśmy poprzednio. Zmiana taka powoduje, iż pryzmatyczny pręt plastyczny zachowuje się w równoległej wiązce światła podobnie jak soczewka cylindryczna. Ten «efekt soczewki»



Rys. 30. Zdjęcia nieobciążonej beleczki

a-beleczka prześwietlana równoległą wiązką naturalnego światła jednobarwnego ($\lambda = 546,1 \text{ m}\mu$) równoległe do powierzchni czołowych, data zdjęcia 12.12.1952 r., b-jak na rys. a tylko przy mniejszej przesłonie, c-jak na rys. a rozproszoną wiązką świetlną, d-beleczka prześwietlona równoległą wiązką światła naturalnego prostopadle do powierzchni czołowych, e-beleczka prześwietlona rozproszoną wiązką światła, f-beleczka prześwietlona równoległą wiązką światła kołowo spolaryzowanego, równoległe do powierzchni czołowych, g-jak na rys. f, wiązka rozproszona, h-jak na rys. f, na ciemnym tle

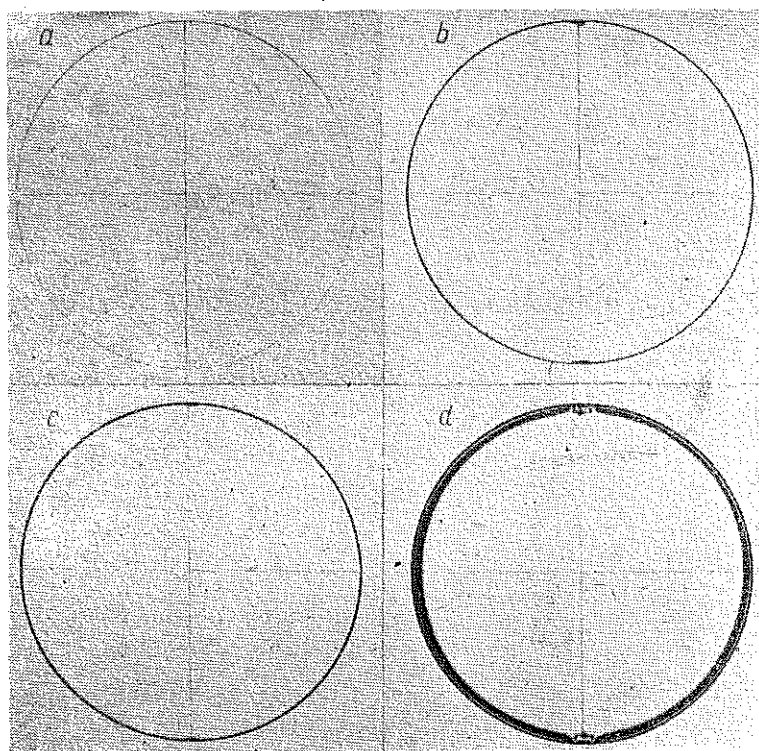
można w znacznym stopniu wyeliminować prześwietlając model, ujawniający taki efekt, rozproszoną wiązką światła. Zdjęcia zamieszczone na rys. 30 ilustrują wyraźnie opisane zjawisko.

Elastoptyczny efekt naskórkowy, polegający na samoczynnym powstawaniu efektu dwojłomności i narastaniu tego efektu od powierzchni modelu w głąb materiału, oraz narastający równocześnie efekt soczewki obejmujemy ogólną nazwą efektu naskórkowego.

Zdjęcia na rys. 30 wykazują poza tym, iż efekt naskórkowy, narastający w arkuszu plastycznym powoli w ciągu dłuższego czasu, wytwarza dość skomplikowany stan naprężeń własnych; izochromy w okolicy wycięcia oraz w okolicy obciętego końca beleczki przebiegają tak, jakby pewien określony stan naprężenia został w beleczce zamrożony, czyli jakby naprężenia w beleczce składały się z właściwych naprężeń własnych oraz z naprężeń zamrożonych. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.

Wynikiem więc efektu naskórkowego, obserwowanego przy prześwietlaniu równoległym do powierzchni czoło-

wych, a przejawiającego się obecnością wzajemnie równoległego układu izochrom, powinien być pewien jednorodny stan napięcia powierzchni czołowych modelu, nie dający się zauważyć przy prześwietlaniu prostopadłym do powierzchni czołowych, oraz zmiana współczynnika załamania światła, którą można dostrzec przy krawędziach modelu, gdy prześwietlająca wiązka światła jest równoległa. Ta ostatnia zmiana uwidacznia się pogrubieniem mniej lub bardziej wyraźnym linii konturowej obrazu modelu.

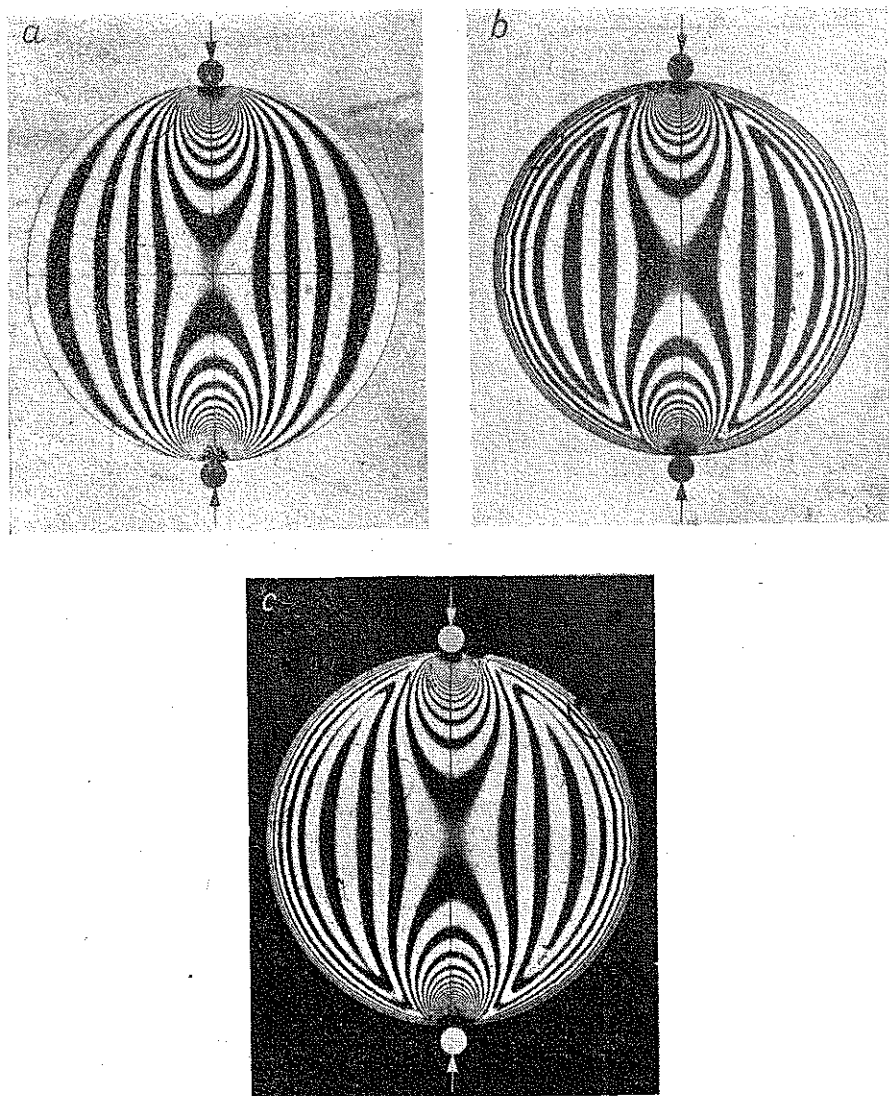


Rys. 31. Zdjęcie okrągłej tarczy z catalinu 800, średnio utwardzonego, grubości 6 mm

a-zdjęcie w świetle naturalnym wykonane dn. 4.2.1952 r., *b*-zdjęcie w świetle naturalnym wykonane dn. 5.2.1952 r., *c*-zdjęcie w świetle naturalnym wykonane dn. 6.2.1952 r., *d*-zdjęcie w świetle kołowo spolaryzowanym wykonane dn. 6.2.1952 r.

Ilustrują to zdjęcia na rys. 31; stanowią one przykład narastania efektu naskórkowo-soczewkowego i efektu naskórkowo-krawędziowego wraz z upływem czasu. Kontur tarczy na zdjęciu pogrubia się wraz z upływem czasu.

Efekt naskórkowy, obserwowany przy świeżo obrobionych krawędziach, jest raczej efektem wypadkowym narastającego efektu naskórkowego na świeżo odkrytej i stykającej się z powietrzem powierzchni



Rys. 32. Zdjęcie izochrom w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami

a-tarcza nie wykazywała efektu naskórkowego — izochromy przebiegają prawidłowo; *b*-tarcza podana na rys. 21 posiadała silny efekt naskórkowy — przebieg izochrom w pobliżu konturu jest zupełnie zniekształcony, *c*-jak na rys. *b*, na ciemnym tle

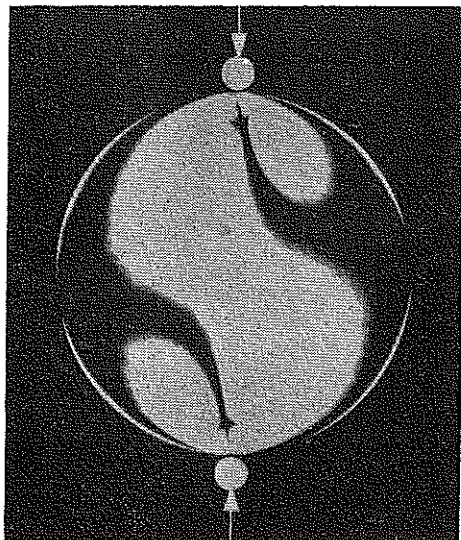
materiału oraz naruszonego stanu równowagi sprężystej materiału, podanego początkowo jednorodnemu stanowi napiecia w płaszczyznach równoległych do czołowych płaszczyzn modelu.

Aby skutecznie zapobiec narastaniu efektu naskórkowego na obrabianych krawędziach, należy nie tylko zapobiec wymianie wilgoci pomię-

dzy obrobionymi powierzchniami krawędziowymi i powietrzem oraz odizolować te powierzchnie od zetknięcia się z nim, ale również poprzednio usunąć lub wydatnie zmniejszyć efekt naskórkowy na powierzchniach czołowych modelu.

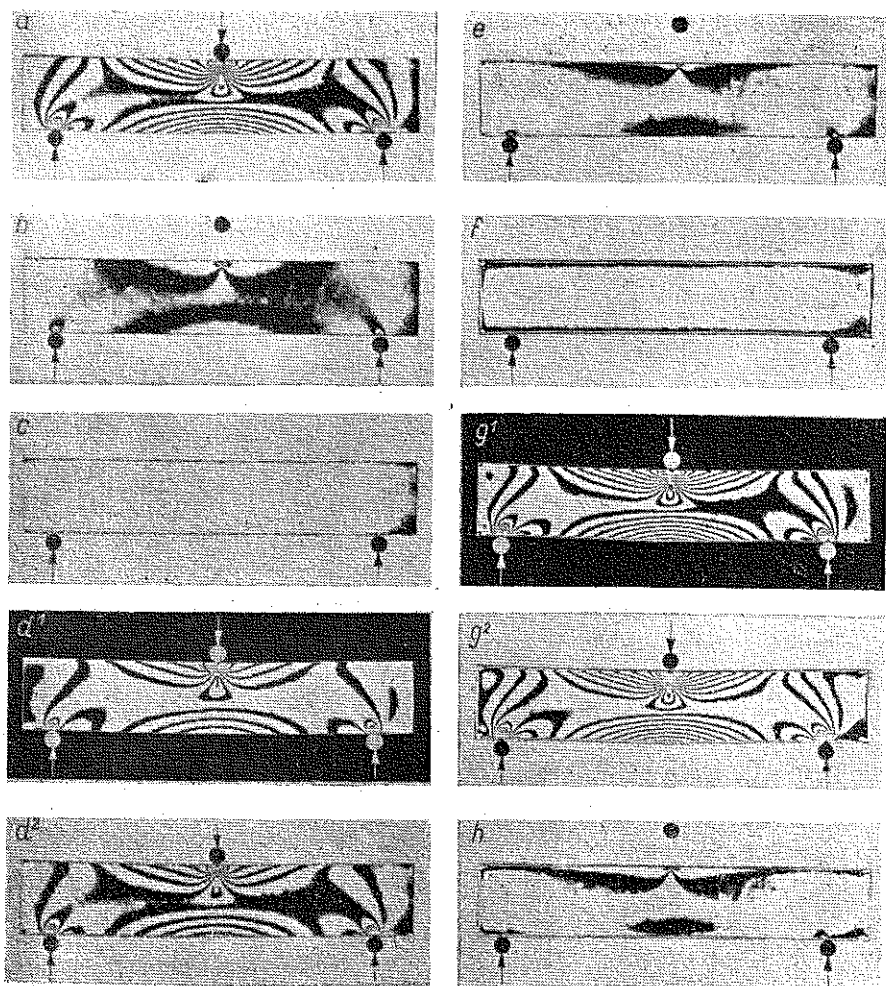
Obecność efektu naskórkowego na krawędzi uniemożliwia lub bardzo utrudnia odczytanie przebiegu i rzędów izochrom w partiach przykrawędziowych modelu.

Ilustrują to rysunki 32, 33 i 34. Rysunek 32 podaje przebieg izochrom w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami. Zdjęcie 32a przedstawia prawidłowy przebieg izochrom, zaś zdjęcie 32b przedstawia przebieg izochrom zniekształcony silnym efektem naskórkowym. Zdjęcie na rys. 33 przedstawia przebieg izokliny 10° w okrągłej tarczy, jak na rys. 32, zakłócony efektem naskórkowym. Rys. 34 przedstawia zdjęcia beleczki z catalinu 800, wykonane w różnym czasie; ilustrują one zarówno narastanie efektu naskórkowego (wpływ na przebieg izochrom, pogrubienie linii konturowej), jak i efekt pełzania optycznego. Izochromy pozostałe po odciążeniu modelu, wywołane pełzaniem optycznym, zanikają początkowo szybko, potem wolniej; po upływie kilkunastu minut od chwili zdjęcia obciążenia efekt optyczny, spowodowany pełzaniem optycznym pod obciążeniem, jest już nieznaczny.



Rys. 33. Zdjęcie izokliny 10° w okrągłej tarczy wykonanej z CR-39 wykazującej nieznaczny efekt naskórkowy

Efekt naskórkowy powodujący powstawanie naprężeń w modelu wpływa poza tym bardzo niekorzystnie na wartość i charakter pełzania materiału modelu pod obciążeniem, gdyż różne partie tego samego przekroju poprzecznego modelu posiadają różne wartości naprężeń, będących wypadkowymi naprężeń wymuszonych przez obciążenie modelu i naprężeń własnych. W rezultacie wielkość naprężeń w kierunku grubości modelu nie jest stała, lecz zmienia się, i to tym bardziej, im większy jest efekt naskórkowy, co zmusza do stosowania niższych wartości naprężeń wymuszonych, a więc i niższych wartości sił i momentów obciążających.



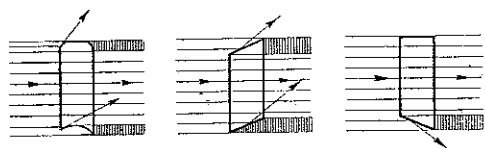
Rys. 34. Narastanie efektu naskórkowego na krawędziach beleczki wyciętej z nieutwardzonego i nieobrabianego ciepłnie catalinu 800. Materiał beleczki wykazywał pewną anizotropię optyczną, objawiającą się nieregularnym rozmazywaniem się izochrom

a-zdjęcie wykonane w parę godzin po obróbeniu modelu, *b*-zdjęcie jak *a* wykonane bezpośrednio po odciążeniu modelu, *c*-zdjęcie wykonane 24 godziny po wykonaniu modelu przed obciążeniem — widać narastający efekt naskórkowy, *d*-zdjęcie jak *c*, bezpośrednio po obciążeniu modelu, *e*-zdjęcie jak *c*, bezpośrednio po zdjęciu obciążenia, *f*-zdjęcie wykonane 7 dni po wykonaniu modelu, przed obciążeniem, *g*-zdjęcie jak *f*, po przyłożeniu obciążenia, *h*-zdjęcie jak *f*, bezpośrednio po zdjęciu obciążenia

2. Wpływ wykonania modelu

2.1. Wady kształtu geometrycznego modelu. Poprawnie wykonany model posiada powierzchnie krawędziowe niezłamane i prostopadłe do powierzchni czołowych. Tak wykonany model, umieszczony w równoległej wiązce światła w taki sposób, iż jego powierzchnie czołowe są prostopadłe do osi optycznej układu, daje na ekranie obraz czysty, o ostro

zarysowanych i cienkich liniach konturowych. Jeśli chociaż jeden z powyższych warunków nie jest spełniony, to linia konturowa obrazu modelu pogrubia i rozszerza się w odpowiedniej partii krawędzi, zaciemniając obraz izochrom dochodzących w tych miejscach do krawędzi. Efekt ten, zwiększający się wraz ze zwiększaniem grubości modelu przy takich samych wadach wykonania, nazwiemy efektem «grubościowym» (*space effect*), [1], [9], [11]. Efekt grubościowy wywołany więc jest brakiem równoległości pomiędzy kierunkiem promieni wiązki świetlnej i odpowiadającymi partiami powierzchni krawędziowej modelu. Efekt



Rys. 35. Najczęstsze wady kształtu geometrycznego modelu powodujące powstawanie efektu grubościowego

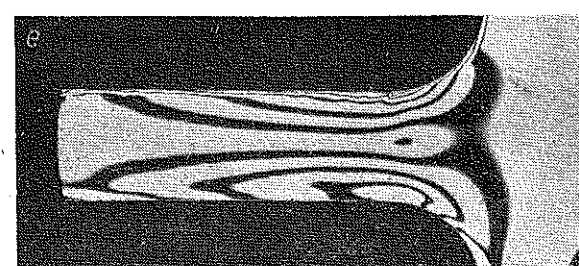
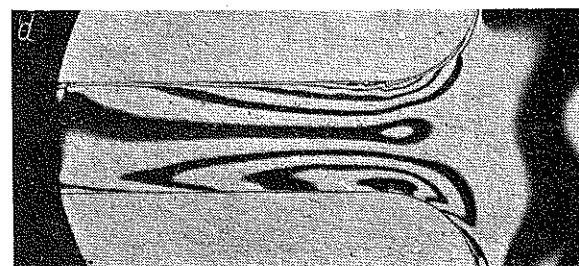
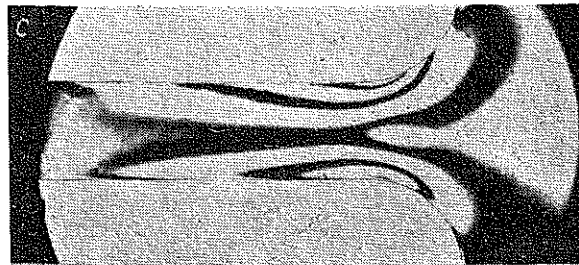
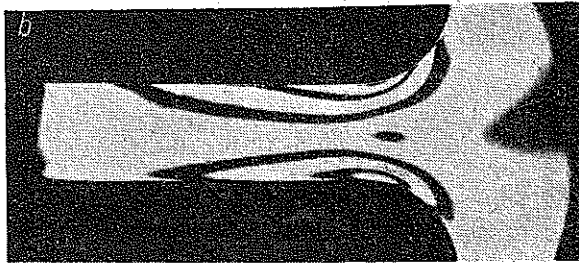
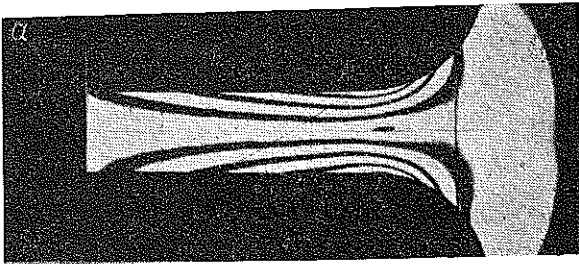
Rysunki przedstawiają przekroje modelu płaszczyzną równoległą do osi optycznej układu; powierzchnie krawędziowe nie są prostopadłe do powierzchni czolowych modelu

grubościowy, spowodowany wadliwym wykonaniem modelu, nie daje się usunąć przez zmianę ustawienia przyrządu; w takim przypadku model należy poprawić lub wykonać na nowo.

Charakterystyczne wady kształtu geometrycznego modelu, powodujące powstawanie efektu grubościowego, przedstawione są na rys. 35.

Efekt grubościowy w żadnym przypadku nie powinien występować w ważnych partiach modelu, które podlegają szczególnie starannej obsłudze. Jeśli nie pomaga zmiana położenia modelu, a poprawa krawędzi modelu za pomocą pilnika mogłaby znacznie zmienić kształt, to opłaca się wykonać nowy model. Należy zwrócić uwagę na to, iż polerowanie partii przykrawędziowych modelu po jego wykonaniu prowadzi do załamania krawędzi, a więc do powstania efektu grubościowego.

2.2. Naprężenia obróbcze. Każda obróbka modelu powoduje powstanie naprężeń w obrabianej przykrawędziowej partii modelu, zwanych naprężeniami «obróbczymi». Naprężenia te przy prawidłowo wykonanym modelu są tak małe, iż wpływ ich nie wykracza poza linię konturową obrazu modelu. Naprężenia obróbcze, jeśli są znaczne, mogą utrudnić lub uniemożliwić pomiar naprężeń na krawędziach modelu i w partiach przykrawędziowych. Naprężenia obróbcze mogą być wywołane bądź odkształceniami plastycznymi materiału na powierzchni obrabianej, bądź mogą stanowić efekt wtórny znacznego podwyższenia się temperatury części modelu, leżących przy powierzchniach obrabianych, i spowodowanych tym zmian chemicznych w przegrzanych partiach modelu, [5], [9], [15]. Odkształcenia plastyczne materiału przy obróbce powodują zawsze powstanie naprężeń ściskających.



Rys. 36. Przebieg izochrom w pręcie zginanym siłą skupioną (wszystkie pręty wykonane na wycinarce, rys. 7)

a-materiał pręta żywica gliptalowa BT-61893 — model prawidłowo wykonany, przebieg izochrom prawidłowy, *b*-materiał żywica fenolowa catalin 800, efekt obróbczy spowodowany odkształceniami plastycznymi; w wyniku zbyt dużego nacisku narzędzia skrawającego na krawędź powstały naprężenia ściskające — przebieg izochrom zniekształcony, *c*-jak *b*, na jasnym tle, *d*-materiał żywica styrenowa CR-39, efekt obróbczy spowodowany niejednakowymi odkształceniami plastycznymi (uderzenie narzędzia) oraz przegrzaniem materiału przy obróbce; przebieg izochrom zniekształcony w sposób nieregularny, *e*-jak *d*, na ciemnym tle

Wynikiem istnienia naprężeń obróbczych jest zniekształcenie przebiegu izochrom, czyli tzw. efekt obróbczy. Zdjęcia na rys. 36 ilustrują wpływ efektu obróbczego na przebieg izochrom w pręcie zginanym siłą skupioną. Porównanie zdjęć wykonanych na jasnym i ciemnym tle pola widzenia pozwala na dokładniejsze określenie stopnia zniekształcenia izochrom (por. rys. 36b i 36c) oraz na wyeliminowanie efektu miejscowych wyszczerbień krawędzi modelu, uwidaczniających się zwłaszcza na zdjęciach na ciemnym tle (rys. 36d i 36e). Naprężenia obróbcze wywołane są zwykle zbyt dużym naciskiem narzędzia obrabiającego, zbyt tępym narzędziem oraz zbyt intensywną obróbką, powodującą znaczne podwyższenie temperatury materiału, czyli, ogólnie mówiąc, mało staranną obróbką modelu. Anizotropia optyczna materiału spowodowana naprężeniami obróbczymi na ogół nie daje się usunąć; wtedy należy wykonać nowy model.

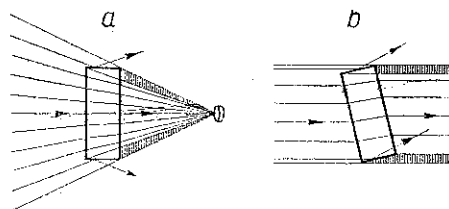
3. Wady układu optycznego oraz wady jego ustawienia

Wady układu optycznego polaryskopu bądź to organiczne (polaryskop pracujący na wiązce zbieżnej), bądź spowodowane złym ustawieniem całości wywołują efekt podobny do wyżej opisanego efektu grubościowego, czyli pogrubienie linii konturowych na ekranie; dlatego nazywamy ten efekt również efektem grubościowym. Efekt sam spowodowany jest nierównoległością promieni przechodzących przez model i trafiających do obiektywu. Zależy on również od grubości modelu i wzrasta z jego wielkością.

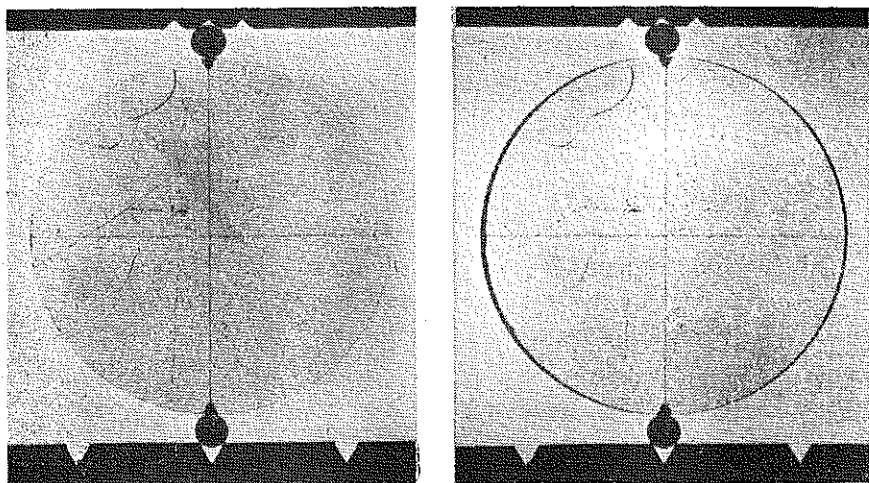
Podobnie wadliwe, mianowicie nieprostokątne ustawienie powierzchni czołowych modelu do osi optycznej układu powoduje powstanie efektu grubościowego.

Przy pracy na polaryskopie, w którym model prześwietlany jest zbieżną wiązką światła, efekt grubościowy jest nieunikniony; linie konturowe modelu są tym grubsze, im dalej leżą od osi optycznej układu. Powstający w ten sposób efekt grubościowy można zmniejszyć do rozsądnej wielkości, stosując obiektyw o możliwie długiej ogniskowej, umieszczony dostatecznie daleko od modelu, [2], [10].

Opisane przyczyny powstawania efektu grubościowego przedstawione są na rysunkach 37, 38 i 39.

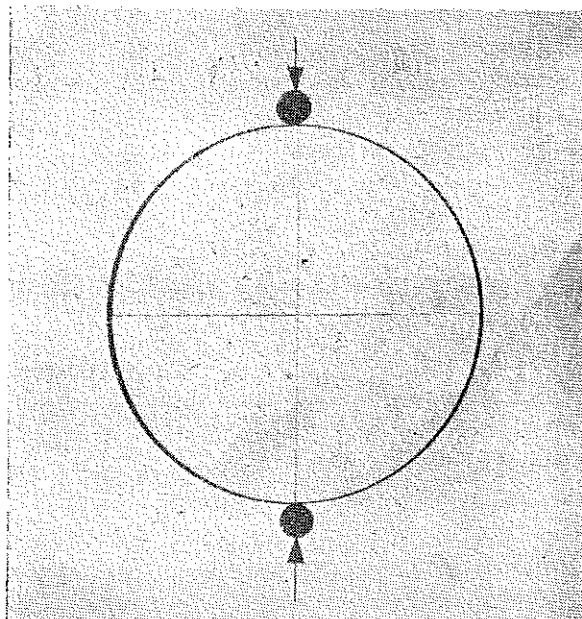


Rys. 37. Wady układu optycznego (a) oraz wady ustawienia (b) powodujące powstawanie efektu grubościowego



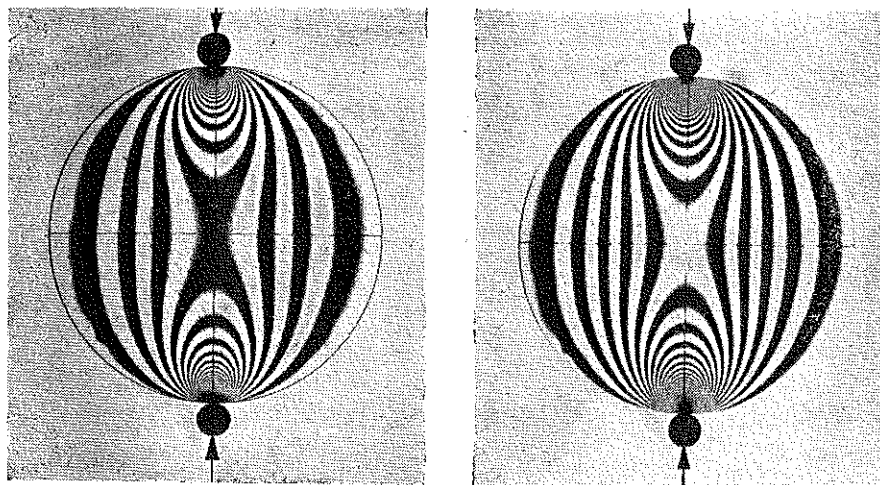
Rys. 38. Zdjęcia okrągłej tarczy wykonanej prawidłowo (lecz niedostatecznie wypolerowanej), wykonane w równoległej wiązce światła naturalnego, materiał tarczy BT-61893

a-powierzchnia czołowa tarczy jest prostopadła do osi optycznej układu, linia konturowa obrazu tarczy jest cienka, *b*-powierzchnia czołowa tarczy nie jest prostopadła do osi optycznej układu, widoczny jest wyraźny efekt grubościowy



Rys. 39. Zdjęcie jak na rys. 32b z tą różnicą, iż model był dobrze wypolerowany oraz wykazywał lekki efekt naskórkowo-soczewkowy; materiał tarczy plexiglas

Na rysunku 38 podane są zdjęcia okrągłej tarczy, ustawionej prostopadle i nieprostopadle do osi optycznej układu pracującego na równoległej wiązce świetlnej; widoczny tu jest wyraźny efekt grubościowy. Powierzchnia modelu była niedostatecznie wypolerowana — stąd rysy i nierówności. Tego rodzaju wady powierzchni stanowią na ogół jedynie usterkę «kosmetyczną». Linia konturowa modelu na zdjęciu 38a jest poprawna.



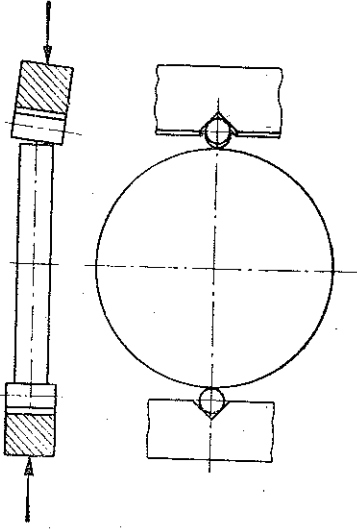
Rys. 40. Zdjęcie niedostatecznie wypolerowanej okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, dokonane przy świetle spolaryzowanym kołowo

a-zdjęcie w równoległej wiązce światła, b-zdjęcie w rozproszonej wiązce światła

Zasadniczy wpływ na stopień występowania na zdjęciu wad powierzchni modelu, spowodowanych niedostatecznym wypolerowaniem lub zadrapaniami, posiada charakter wiązki świetlnej oraz wielkość przesłony umieszczonej w ognisku obiektywu. Wiązka rozproszona tuszuje wady powierzchni modelu. Przy pracy na wiązce równoległej wady powierzchni modelu występują na zdjęciach tym jaskrawiej, im mniejszy jest otwór przesłony umieszczonej w ognisku obiektywu. Zjawisko to ilustrują zdjęcia na rys. 40. Zdjęcia na rys. 38 wykonane zostały przy małej przesłonie. Dodatkowym efektem niewłaściwego ustawienia modelu jest pewne zafałszowanie położenia izochrom, gdyż promienie przechodzą przez model nieprostopadle do jego powierzchni, a więc przez punkty o różnych na ogół stanach naprężenia.

4. Wpływ dokładności i wartości obciążenia

Często zdarzającym się błędem jest nie spełnienie warunku, aby wypadkowe sił obciążających leżały w płaszczyźnie środkowej modelu. Obciążenie siłami skupionymi realizujemy w praktyce przez wałeczki lub ostrza przylegające na całej długości do powierzchni krawędziowej modelu. Wałeczki te powinny być do siebie równoległe; zwichrowanie ich powoduje nierównomierne przyleganie do powierzchni krawędziowej modelu, co w rezultacie daje nierównomierne obciążenie modelu.



Rys. 41. Przykład wadliwego ustawienia modelu — szkic ustawienia

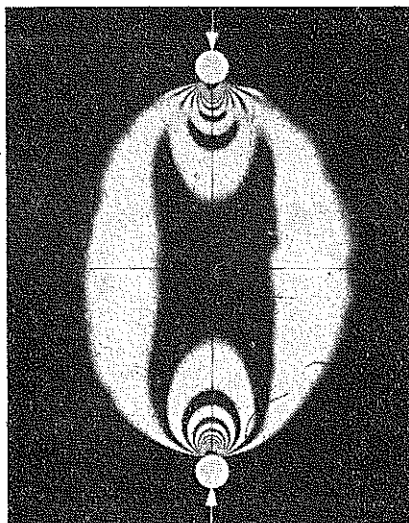
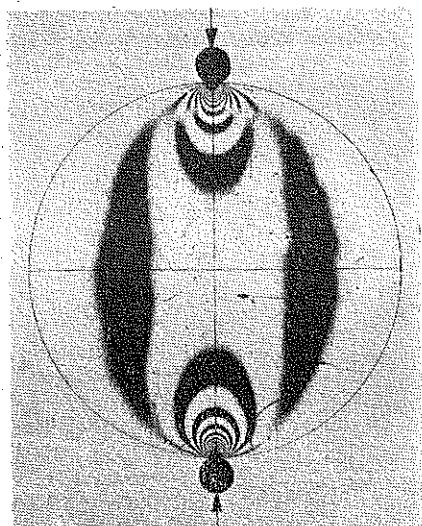
górny wałeczek obciążający naciska na krawędź modelu, powodując odchylenie od płaskiego stanu napęcia, zwłaszcza w najbliższej położonych partiach modelu oraz w okolicy dolnego wałeczka

Efektom ostatecznym nierównoległości wałeczków, względnie ostrzy obciążających, jest wystąpienie mniej lub więcej wyraźnego trójwymiarowego stanu naprężenia, a w rezultacie zakłócenie przebiegu izochrom i izoklin, zwłaszcza w sąsiedztwie punktu działania sił, oraz zanik punktów osobliwych. Zakłócenie to — zgodnie z zasadą *S a i n t V e n a n t a* — na ogół szybko zanika wraz ze wzrostem odległości od punktu przyłożenia siły. To zjawisko zilustrowane jest rysunkami 41-42 podającymi przebieg izochrom w wadliwie obciążonej tarczy (zdjęcie to pokazuje równocześnie wpływ wadliwego obciążenia na obraz izochrom przy ciemnym i jasnym polu widzenia). Na rysunku 41a podany jest szkic ustawienia modelu; górny wałeczek obciążający jest ustawiony skośnie i naciska krawędź modelu, nie naciskając równomiernie na całą powierzchnię krawędziową. W wyniku tego stanu rzeczy przebieg izochrom w sąsiedztwie wadliwie przyłożonych obciążeń, zwłaszcza zaś obciążenia

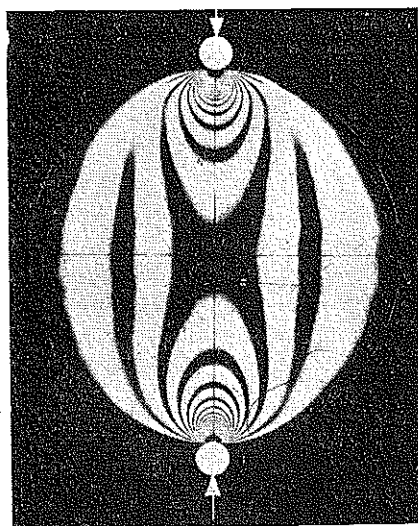
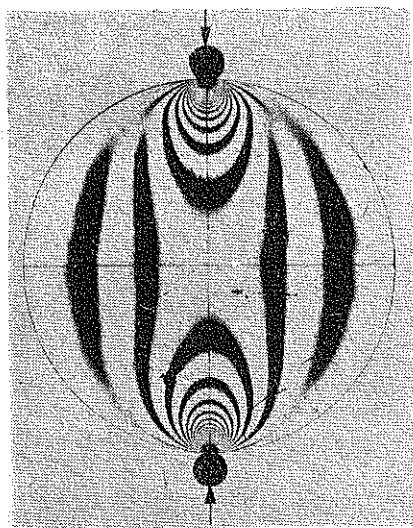
górnego, został zniekształcony — izochromy przerywają się; zniekształcenie to można zauważyć porównując przebieg izochrom w dolnej i górnej połowie tarczy z przebiegiem izochrom na zdjęciach według rys. 40.

Przy wyższych wartościach sił obciążających wałeczki wciskają się w odkształcający się plastycznie materiał modelu, co wyrównuje rozkład obciążeń na powierzchni krawędziowej modelu, jak to jest widoczne z dalszych zdjęć na rys. 42.

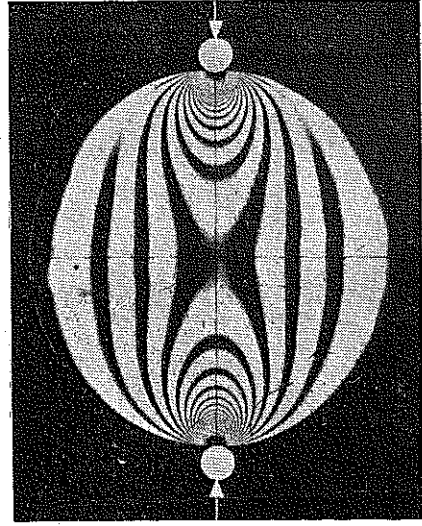
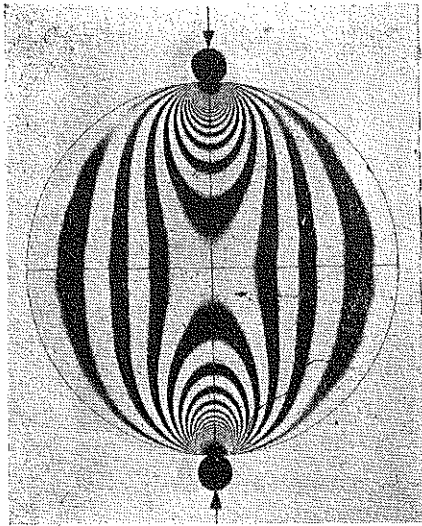
Trójwymiarowy stan naprężenia występujący wyraźnie w okolicy nieprawidłowo przyłożonych sił obciążających wpływa również zakłócająco na przebieg izoklin; izokliny w tych partiach modelu zanikają. Ilustrują



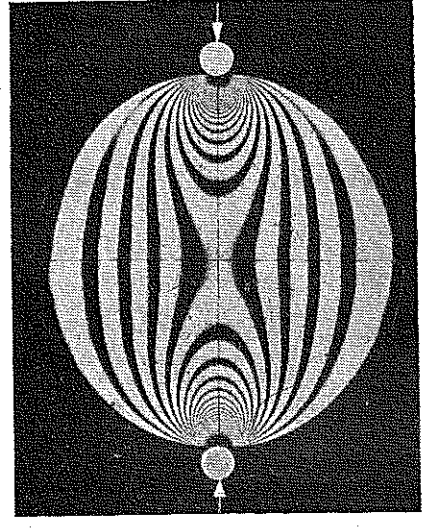
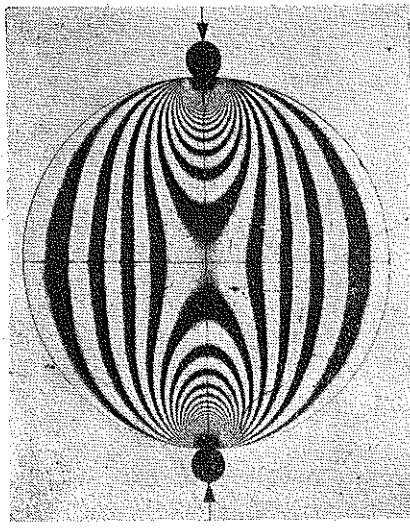
Rys. 42a. $P = 33,8$ kG



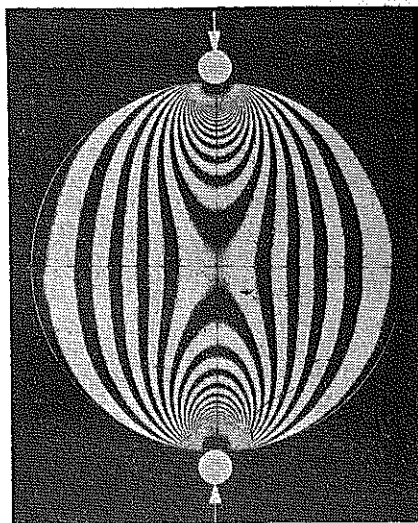
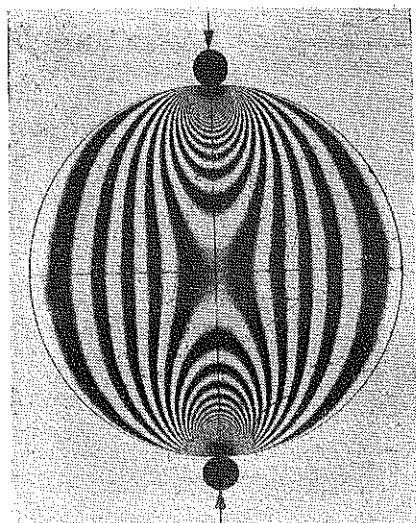
Rys. 42b. $P = 67,6$ kG



Rys. 42c. $P = 101,4 \text{ kG}$



Rys. 42d. $P = 135,2 \text{ kG}$



Rys. 42e. $P = 155,4 \text{ kG}$

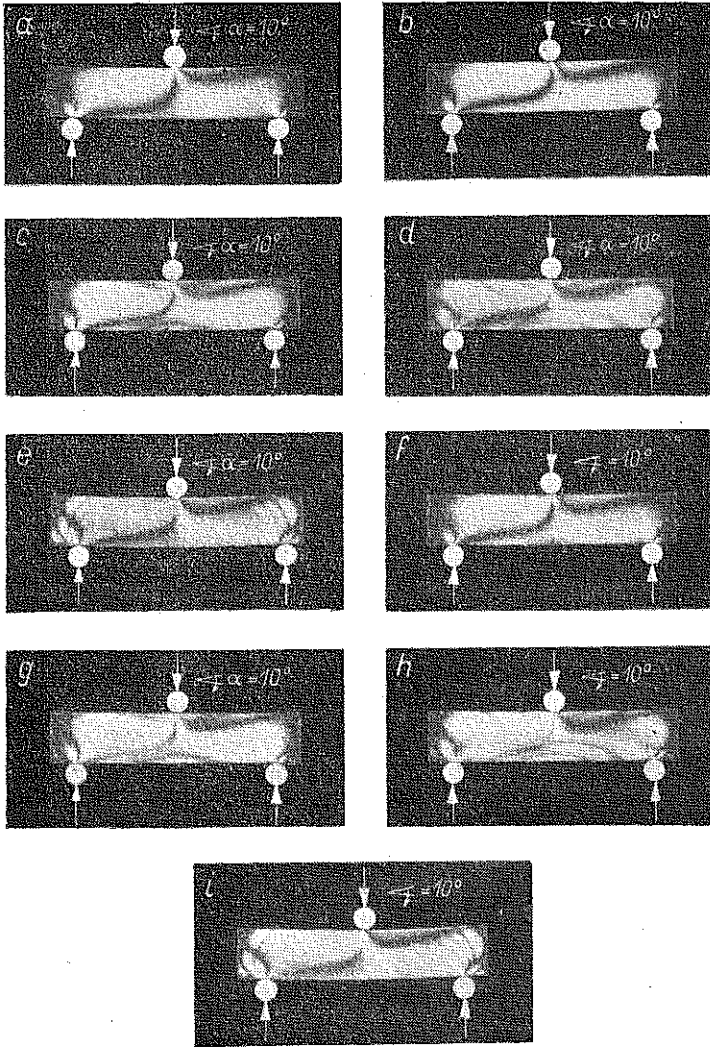
Rys. 42. Zdjęcia izochrom w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, dokonane przy ustawieniu jak na rys. 41 przy różnych wartościach sił obciążających P

Materiał tarczy BT-61893, grubość 7 mm, ϕ 55 mm

to zdjęcia na rys. 43, przedstawiające przebieg izokliny 10° w beleczce zginanej siłą skupioną. Ze zdjęć wynika, iż nieprawidłowy sposób obciążenia zakłóca wyraźnie przebieg izoklin dopiero przy większych wartościach dwójłomności wymuszonej (gdy pojawiają się pierwsze izochromy), z tym iż przy dostatecznie dużych obciążeniach wpływ wadliwego obciążenia maleje. (na skutek odkształceń plastycznych krawędzi modelu wypadkowa siła przekazywana na model przez wałeczek zbliża się do płaszczyzny środkowej modelu).

Bardzo nieprzyjemnym efektem trójwymiarowego stanu naprężenia, wywołanego wadliwym obciążeniem modelu, jest zanik lub rozmazanie się punktów osobliwych; punkty te, jeśli nie zanikają zupełnie, to przybierają kształt półksiężyców lub przerwanych owali.

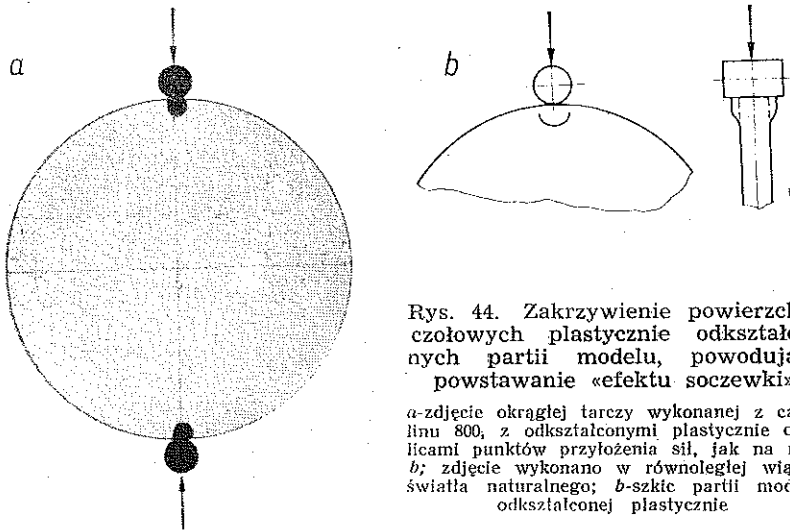
Wpływ odkształceń plastycznych materiału modelu powstających pod działaniem sił skupionych jest dwójaki. Przede wszystkim powierzchnie czołowe plastycznie odkształconych partii modelu zakrzywiają się, jak na rys. 44, dając w równoległej wiązce światła «efekt soczewki» na skutek odchylenia promieni świetlnych, zaś odkształcona plastycznie partia materiału stanowi niejako klin powodujący powstanie naprężeń własnych w modelu, które zniekształcają przebieg izochrom. Za przykład niech służy przebieg izochrom w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, przedstawiony na rys. 45. Przy niezbyt



Rys. 43. Przebieg izoklin 10° w beleczce podpartej zginanej siłą skupioną. Zdjęcie *a* przedstawia beleczkę z plexiglasu — zdjęcie w świetle białym. Zdjęcia następne przedstawiają beleczkę z CR-39; zdjęcia te są wykonane w świetle białym i prześwietlone w celu zatuszowania izochrom

a-beleczka z plexiglasu prawidłowo obciążona, $P = 75$ kG, przebieg izokliny prawidłowy; *b*-beleczka z CR-39 prawidłowo obciążona, $P = 5$ kG, izoklina dobrze widoczna; *c*-beleczka z CR-39 prawidłowo obciążona, $P = 10$ kG, izoklina dobrze widoczna; *d*-beleczka z CR-39 prawidłowo obciążona, $P = 20$ kG, izoklina dobrze widoczna; *e*-beleczka z CR-39 prawidłowo obciążona, $P = 80$ kG, *f*-beleczka z CR-39 nieprawidłowo obciążona (jak na rys. 41 — dolny lewy) waleczek pochylony, $P = 5$ kG, izoklina dobrze widoczna; *g*-waleczek pochylony, $P = 10$ kG, izoklina częściowo zanikła; *h*-waleczek pochylony, $P = 20$ kG, izoklina zanikła w wyższym stopniu; *i*-waleczek pochylony, $P = 80$ kG, izoklina ponownie widoczna. Uwaga: zdjęcie izokliny w beleczce z plexiglasu, jak na rys. *a*, obciążonej nieprawidłowo jak na rys *f*, jest takie samo jak zdjęcie na rys. *a*

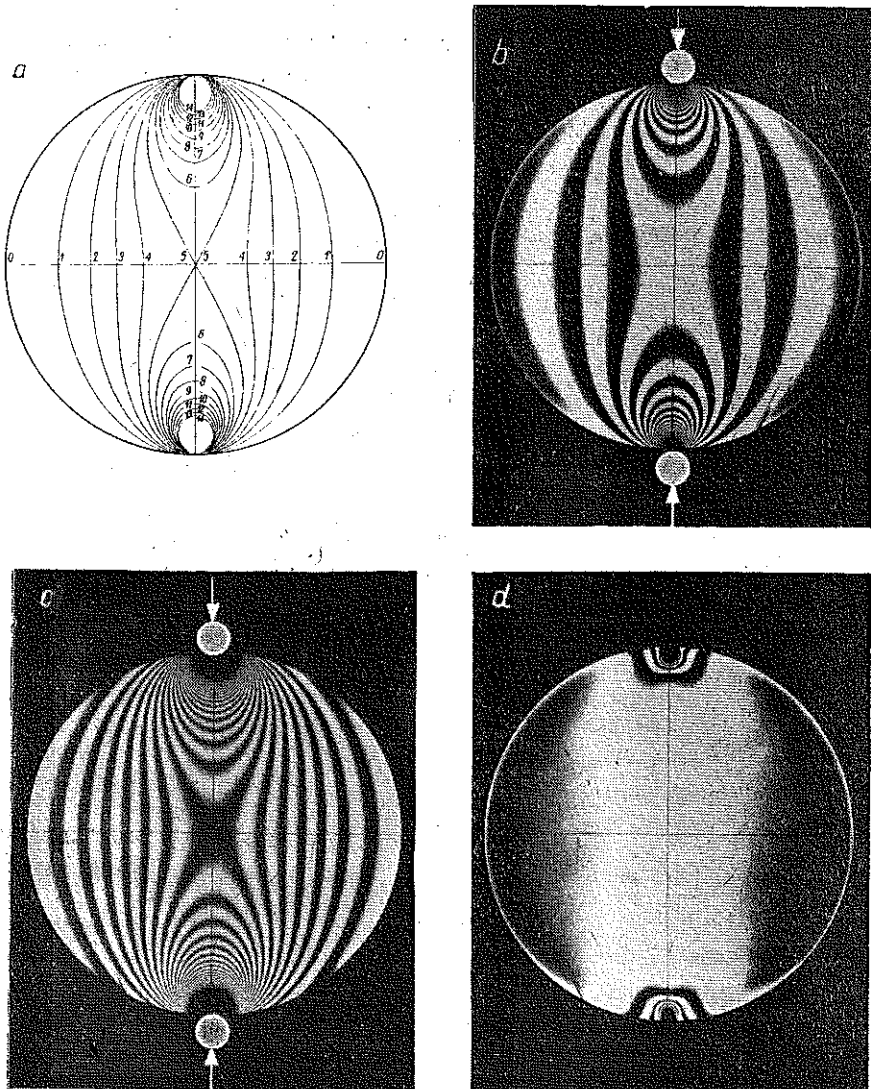
wysokiej wartości obciążenia (w odniesieniu do własności materiału), nie powodującej znacznie większych odkształceń plastycznych uwidaczniających się na zdjęciu w postaci ciemnych plam (efekt soczewki), przebieg izochrom jest na ogół zgodny z teoretycznym, jak to wynika z porównania rys. 45a z rys. 45b. Przy zbyt wysokim obciążeniu, wówczas gdy obszar odkształceń plastycznych jest znacznie większy, przebieg izochrom



Rys. 44. Zakrzywienie powierzchni czołowych plastycznie odkształconych partii modelu, powodujące powstawanie «efektu soczewki»

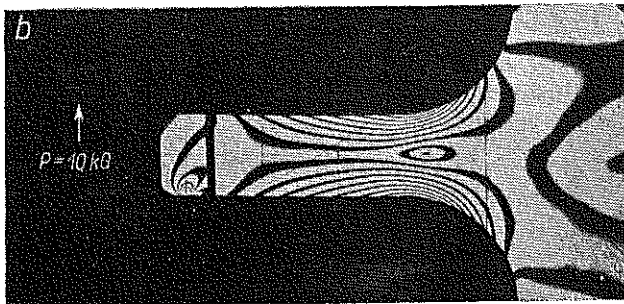
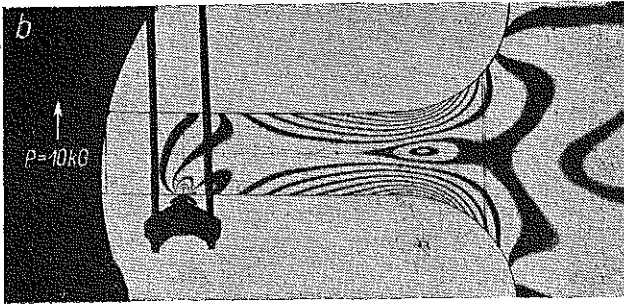
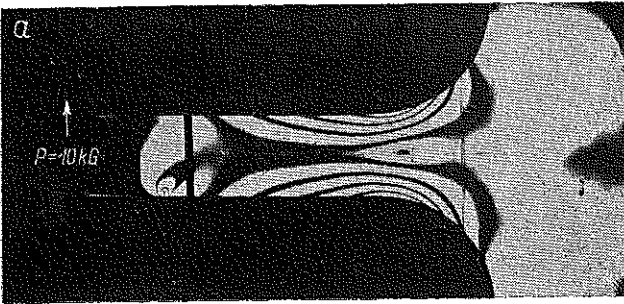
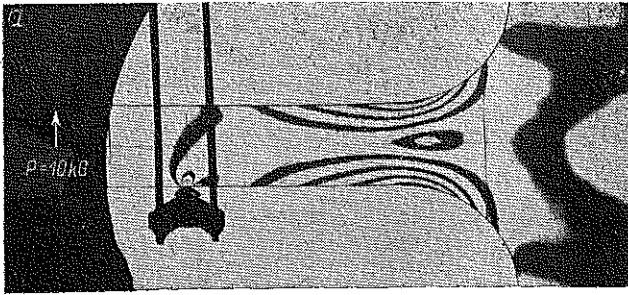
a - zdjęcie okrągłej tarczy wykonanej z ciałina 800, z odkształconymi plastycznie okolicami punktów przyłożenia sił, jak na rys. *b*; zdjęcie wykonano w równoległej wiązce światła naturalnego; *b* - szkic partii modelu odkształconej plastycznie

w omawianym przypadku jest zakłócony, nawet w obszarach bardziej oddalonych, co widoczne jest na rys. 45c. Po odciążeniu modelu przedstawionego na rys. 45c pozostał w okolicy obszarów odkształconych plastycznie pewien stan naprężenia uwidoczniiony przez zespół izochrom, jak to pokazuje rys. 45d. Wartość obciążenia posiada zasadniczy wpływ na rząd powstających izochrom, a tym samym na wartość błędu pomiarowego; im wartość obciążenia jest wyższa, tym wyższy jest rząd izochrom, a więc tym mniejszy jest względny błąd pomiarowy wywołany początkową anizotropią optyczną modelu. Poza tym w miarę wzrostu obciążenia wzrasta gradient naprężeń, wobec czego izochromy stają się cieńsze; ułatwia to znakomicie poprawne ustalenie przebiegu izochromy. Opisany wpływ ilustrujemy zdjęciami na rys. 46, podającym przebieg izochrom w przeciętym utwierdzonym, zginanym siłą skupioną. Zdjęcia te wykonane są jak przeciętne zdjęcia pomiarowe, to znaczy na jasnym i ciemnym polu widzenia przy określonych wartościach obciążeń. Wpływ wartości obciążenia na dokładność izoklin omówimy w p. 5.

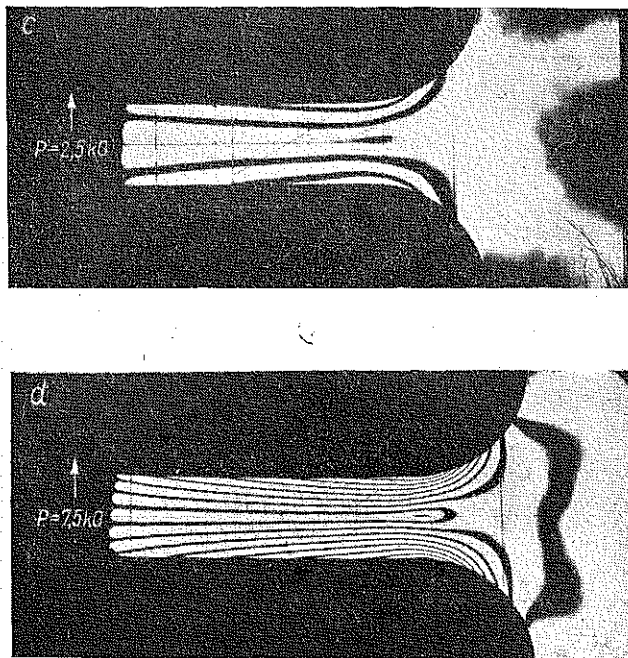


Rys. 45. Wpływ odkształceń plastycznych na przebieg izochrom w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami

materiał tarczy catalin 800, średnio utwardzony; *a*-teoretyczny przebieg izochrom wyznaczony na podstawie zależności teorii sprężystości; *b*-doświadczalny przebieg izochrom przy odpowiednio dobranej wartości sił obciążających; nieznaczne zniekształcenia w okolicach punktów przyłożenia sił; *c*-przebieg izochrom przy wysokiej wartości sił obciążających; znaczne zniekształcenia przebiegu izochrom; *d*-stan napiecia po odjęciu sił obciążających, spowodowany powstałymi odkształceniami plastycznymi w sąsiedztwie punktów przyłożenia sił



Rys. 46



Rys. 46. Zdjęcia izochrom w pręcie utwierdzonym, zgiętym siłą skupioną P , wykonywane w tych samych warunkach, przy różnych wartościach siły obciążającej materiał pręta BT-61893; *a*-siła $P = 10$ kG, *b*-siła $P = 20$ kG, *c*-siła $P = 2,5$ kG (siła przyłożona poza zdjęciem), *d*-siła $P = 7,5$ kG, (siła przyłożona jak w *c*)

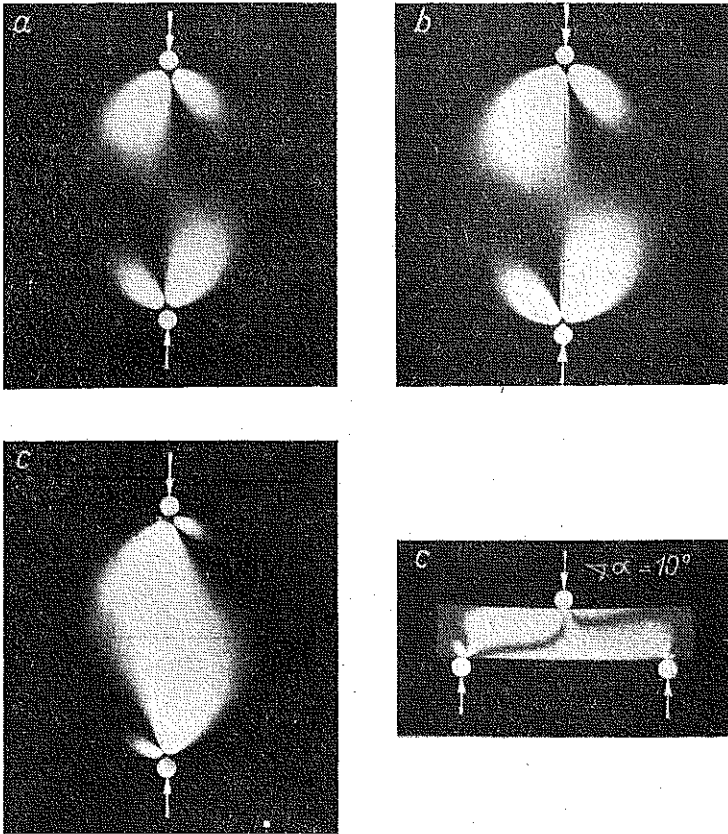
5. Wpływ techniki rejestracji

Pomiary elastoptyczne z reguły rejestrujemy fotograficznie, chyba że chodzi jedynie o pomiar orientacyjny, przy którym wystarcza rejestracja odręczna. Omawiamy obecnie tylko rejestrację fotograficzną.

5.1. Rejestracja izoklin. Stosujemy dwie różne techniki fotografowania izoklin zależnie od materiału modelu. Do zdjęć izoklin możemy użyć tego samego modelu, co do zdjęć izochrom, a więc materiału o wysokiej wartości stałej materiałowej; można też wykonać drugi model z materiału mniej czułego optycznie i o niskiej wartości stałej materiałowej, ale posiadającego inne zalety, jak mała wartość pełzania, brak efektu naskórkowego, pełna izotropia optyczna itd. (np. żywice metakrylowe). Najchętniej używanym materiałem na modele do zdjęć izoklin jest plexiglas.

Jeśli gradient różnicy naprężeń głównych w większych partiach modelu jest zbyt mały, to zdjęcia izoklin na modelu z plexiglasu w takich partiach modelu są słabo czytelne; izokliny są rozmazane i rozplywają

się; przypadek taki zachodzi np. w okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, w której nie można jednoznacznie określić przebiegu izoklin w dużej ich części. Odmiennie natomiast przedstawia się sprawa przy belce podpartej i obciążonej siłą skupioną. Te przypadki ilustrują zdjęcia na rys. 47.



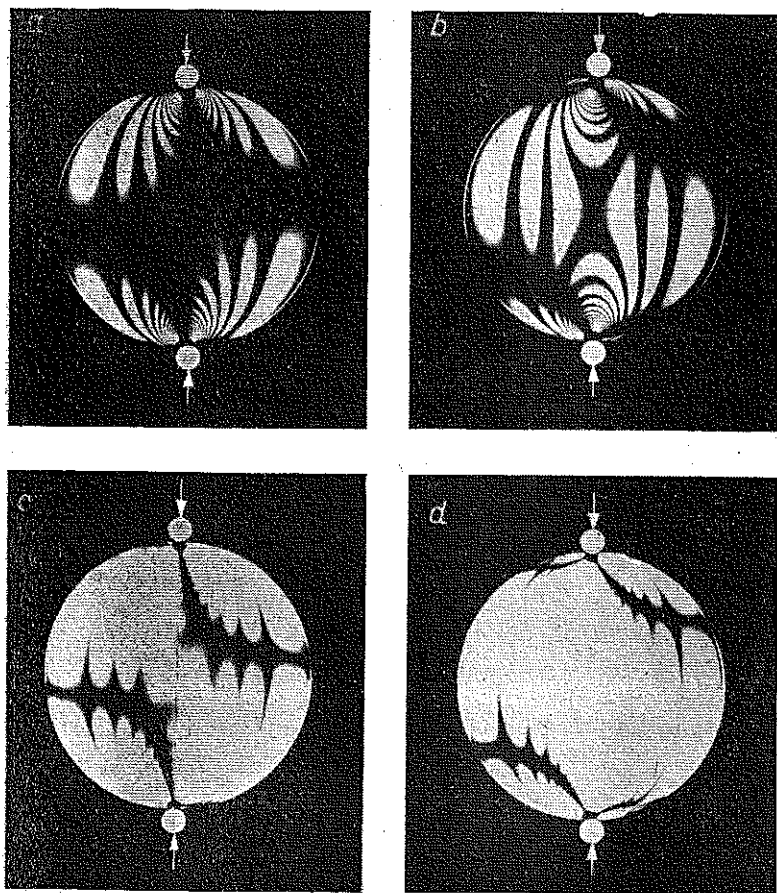
Rys. 47. Zdjęcia izoklin na modelach z plexiglasu w świetle lampy rtęciowej

a-zdjęcie izokliny 10° w tarczy jak na rys. 45, *b*-zdjęcie jak *a* — dłuższy czas naświetlania negatywu, *c*-tarcza jak wyżej izoklina 30° — przebieg izokliny łatwiejszy do ustalenia niż w wypadku *a*, *d*-izoklina w belce podpartej, obciążonej siłą skupioną — przebieg izokliny łatwy do ustalenia

Zdjęcia izoklin w modelach z plexiglasu dokonywujemy przy świetle białym lub jednobarwnym na dowolnych kontrastowych błonach, przy możliwie wysokich wartościach obciążeń.

Wykonując zdjęcia izoklin na modelach z plastyków o wysokiej stałej materiałowej stosujemy z reguły metodę prześwietlenia zdjęć przy użyciu białego, a więc wolframowego lub rtęciowego, źródła światła

oraz — o ile to jest możliwe — błon panchromatycznych. W tym przypadku model obciążamy silnie, aby możliwie zmniejszyć wpływ początkowej anizotropii optycznej modelu na położenie izoklin. Zbyt wysoka wartość obciążenia może jednak spowodować wyboczenie się modelu, co



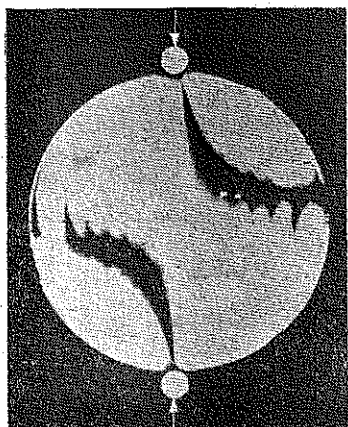
Rys. 48. Zdjęcia okrągłej tarczy ściskanej wzdłuż średnicy dwiema skupionymi siłami, dokonane w równoległej wiązce liniowo spolaryzowanego światła

materiał modelu CR-39; czas zdjęć 24 godziny po wykonaniu modelu, zdjęcia wykonane przy tej samej wartości siły obciążającej; a—światło jednobarwne ($\lambda = 546,1 \text{ m}\mu$), izoklina 10° ; b—światło jednobarwne ($\lambda = 546,1 \text{ m}\mu$), izoklina 30° ; c—światło lampy rtęciowej, zdjęcie prześwietlone, izoklina 10° ; d—światło lampy rtęciowej, zdjęcie prześwietlone, izoklina 30°

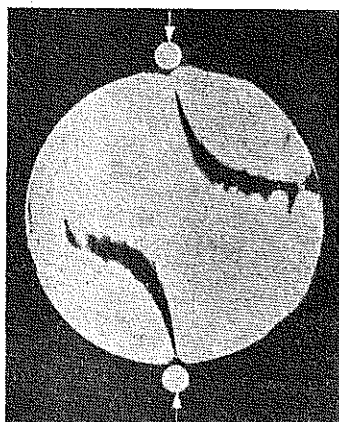
pociąga za sobą zniekształcenie przebiegu izoklin oraz częściowy ich zanik w pewnych partiach modelu, jak to już zostało wyżej omówione. Sygnałem rozpoczynającego się wyboczenia jest zanikanie punktów osobliwych oraz rozjaśnianie się odpowiednich partii izoklin. Ogólnie

biorąc w obszarach, w których panuje trójwymiarowy stan naprężenia, izokliny rysują się błado lub są nawet poprzerywane.

Przy użyciu światła jednobarwnego otrzymamy w takim przypadku na obrazie modelu oba układy linii, izokliny oraz izochromy, jak to ilustrują zdjęcia na rys. 48a i 48b. Przy użyciu światła wolframowego lub (ostatecznie) rtęciowego, stosując dostatecznie długi czas naświetlania zdjęć oraz, o ile to możliwe, błony panchromatyczne, otrzymujemy zdjęcia jak na rys. 48c i 48d — izochromy znikają całkowicie lub w bardzo znacznym stopniu, tak iż przebieg izoklin łatwo jest ustalić. Należy jednak pamiętać, iż nawet stosunkowo drobne, lokalne naprężenia własne modelu spowodować mogą lokalne odchylenia lub przerwania izoklin, jak to jest widoczne na zdjęciu 49, przedstawiającym izoklinę 10° w tarczy jak na rys. 48.



Rys. 49. Zdjęcie izokliny 10° w świetle wolframowym
material tarczy BT-61893; izokliny poprzerwane na skutek obecności lokalnych naprężeń własnych; zdjęcie nieco za długo naświetlane, kontur tarczy staje się miejscami nieostry



Rys. 50. Zdjęcie izokliny 10° w świetle wolframowym
zdjęcie jak na rys. 49, za długo naświetlone — kontur tarczy częściowo zupełnie nieostry

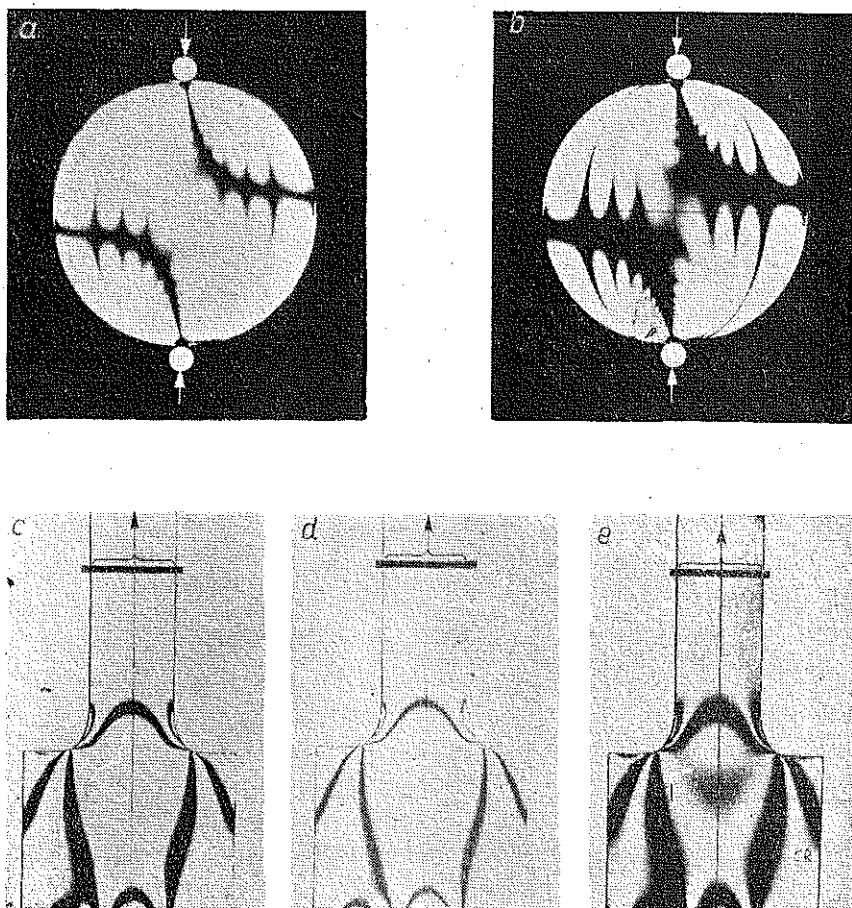
Przy zastosowaniu metody prześwietlania zdjęć izokliny są tym ostrzejsze i cieńsze, im czas naświetlania jest dłuższy. Przy zbyt długim jednak czasie naświetlania zaczynają się zacierać kontury modelu, jak to jest widoczne na rys. 50; taki czas naświetlania jest więc za długi.

5.2. Rejestracja izochrom. Najczęściej spotykanym błędem jest niedoświetlenie zdjęcia; uniemożliwia to wyznaczenie przebiegu izochrom w obszarach spiętrzenia naprężeń, w których izochromy są cienkie i leżą bardzo blisko siebie. Kontrola czasu naświetlania przy zdjęciach izochrom jest podwójna. Przede wszystkim negatyw powinien być kontrastowy, obszary pomiędzy izochromami powinny być zupełnie białe; poza

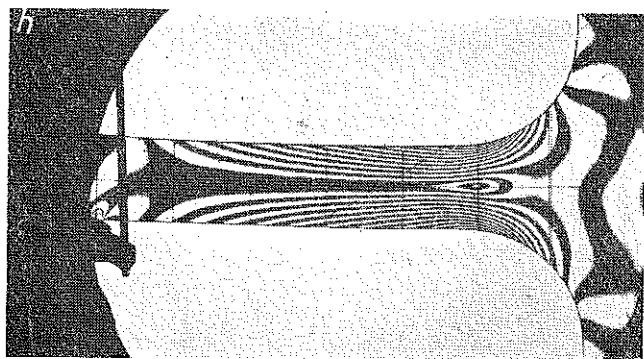
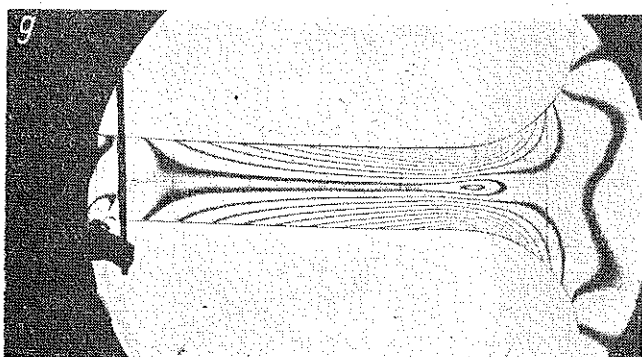
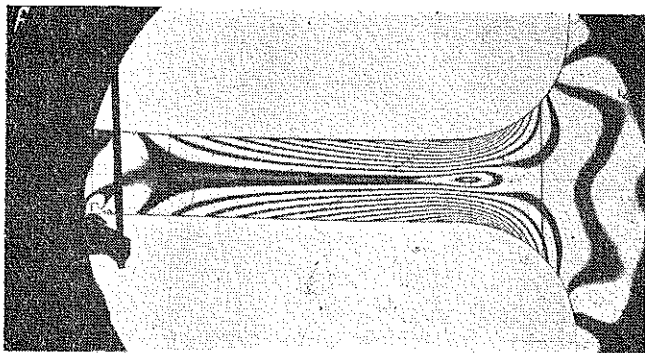
tym izochromy w obszarach, w których się one bardzo zagęszczają, powinny być dobrze widoczne przy obserwacji przez lupę dającą około 10-krotne powiększenie w stosunku do wymiarów modelu.

5.3. Kopiowanie negatywów. Pozytyw — podobnie jak negatyw — powinien być kontrastowy. Im dłuższy jest czas naświetlania, tym szerokość izochrom i izoklin rośnie. Zdjęcia na rys. 51 przedstawiają układy izoklin oraz izochrom otrzymane z tych samych negatywów przy różnych czasach kopiowania, na jasnym i ciemnym polu widzenia. Na zdjęciach rys. 52 widoczny jest wpływ niedoświetlenia negatywu.

Papier na odbitki dobiera się w zależności od charakteru pola naprężeń i od przeznaczenia zdjęcia. Im trwarszy jest papier, tym obraz izoklin oraz izochrom jest plastyczniejszy, jednocześnie jednak tym mniej szczegółów zostaje zarejestrowanych na odbitce.

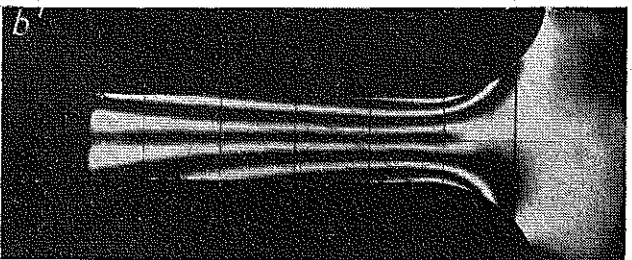
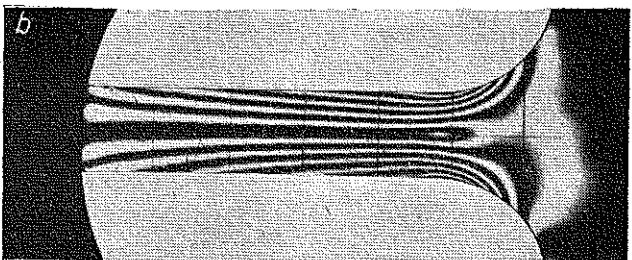
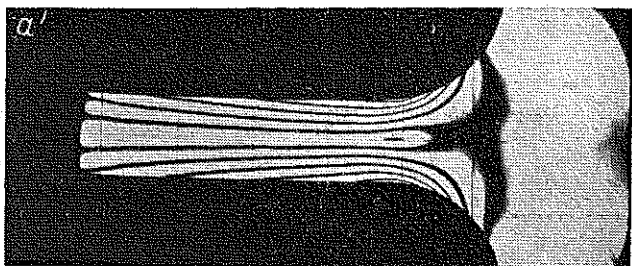
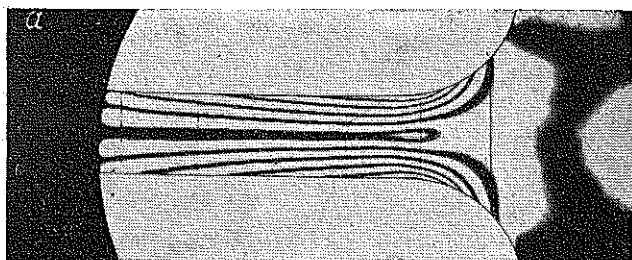


Rys. 51



Rys. 51. Wpływ czasu kopiowania zdjęcia na obraz izoklin i izochrom przy tych samych negatywach

a-odbitka pozytywna z tego samego negatywu co zdjęcie 48 *c*, tylko krócej naświetlana (5 sek.), *b*-jak w *a*, czas kopiowania za długi (90 sek.), *c*-zdjęcie izochrom w przecie ciągłym wykonane w równoległej wiązce zielonego światła rtęci, materiał płyta CR-39, zdjęcie prawidłowo skopiowane (7 sek.), *d*-zdjęcie jak w *c*, czas kopiowania za krótki (3 sek.), *e*-zdjęcie jak w *c*, czas kopiowania za długi (40 sek.), *f*-zdjęcie izochrom w przecie zginanym, wykonane w równoległej wiązce zielonego światła, materiał płyta BT-61893, zdjęcie prawidłowo skopiowane (7 sek.), *g*-zdjęcie jak w *e*, czas kopiowania za krótki (3 sek.), *h*-zdjęcia jak w *f*, czas kopiowania za długi (40 sek.)



Rys. 52. Wpływ czasu naświetlania negatywu na obraz izochrom w pręcie zginanym, prześwietlonym równoległą wiązką zielonego światła rtęci, czasy kopiowania takie same

a-negatyw prawidłowo naświetlony, *b*-negatyw niedoświetlony

Literatura cytowana w tekście

- [1] M. M. F r o c h t, *Photoelasticity*, t. 1. Wiley, New York 1941.
- [2] L. F ö p p l i e. M ö n c h, *Praktische Spannungsoptik*, J. Springer, Berlin 1950.
- [3] H. T. J e s s o p i F. C. H a r r i s, *Photoelasticity — Principles and Methods*, Cleaver-Hume Press, Londyn 1949.
- [4] J. C o o l i d g e, *An Investigation of the Mechanical and Stress-Optical Properties of Columbia Resin CR-39*, Proc. Soc. Exp. Stress Anal., Cambridge Mass., t. 6, 1 (1948).
- [5] A. K u s k e, *Das Kunstharz Phenolformaldehyd in der Spannungsoptik*, Forsch. Ing. Wes., t. 9, 1938.
- [6] M. F. B o k s z t i e j n, *O rozrzeszajuszczcej sile polarizacyjnojj ustanowki dla issledowanja napriazhenij*, Tiechn. Fiz. 10 (1949).
- [7] B. R. L e e, R. M e a d o w s, W. F. T a y l o r, *The Photoelastic Laboratory at the Newport News Shipbuilding and Dry Dock Company*, Proc. Soc. Exp. Stress Anal., t. 6, 1 (1948).
- [8] E. M. M ö n c h, *Praxis des spannungsoptischen Versuchs mit Dekorit als Modellwerkstoff*, Ing. Arch., 16, 3-4 (1948).
- [9] A. K. P r e i s s, *Izgotowlenje płoskich modielej dla polarizacyjno-opticzekowo mietoda issledowanja napriazhenij*, Zawodsk. Labor. 9 (1950).
- [10] A. J. D u r e l l i, *Discussion of the Paper Entitled Photoelasticity Laboratory at the Newport News Shipbuilding and Dry Dock Company*, Proc. Soc. Exp. Stress Anal., t. 6, 1 (1948).
- [11] R. B. H e y w o o d, *Modern Applications of Photo-elasticity*, Inst. Mech. Ing. Journ. a Proc., t. 158, 2 (1948).
- [12] W. A. P. F i s c h e r, *Basic Physical Properties Relied upon in the Frozen Stress Technique*, Inst. Mech. Ing. Journ. a Proc., t. 158, 2 (1948).
- [13] R. W o o r d, C. R. S t o c k, T. A l f r e y Jr., *Measurement of Residual Strees in Thermosetting Plastic*, A.S.T.M. Bull., kwiecień, 1952.
- [14] J. W i j k, *Nouvelles tendances dans les méthodes d'essais des matieres plastiques*, Ind. Plast. Mod., t. 5, 1 (1952).
- [15] E. M ö n c h, *Neue Erkenntnisse zur Herstellung von Modellen für die Spannungsoptik*, Forsch., t. 13, 1 (1949).
- [16] W. L e a f, *The time edge effect: its cause and prevention*, Proc. 15-th Semi-Ann. East. Photoel. Confr., Cambridge (Mass.), 1942.
- [17] B. M a x w e l l, J. P. H a r r i n g t o n, *Effect of Velocity on Tensile Impact Properties of Polymethyl Methacrylate*, Trans. A.S.M.E., t. 74, 4 (1952).

Резюме

ТЕХНИКА ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

На фоне общей характеристики темы и проведения поляризационно-оптических исследований, а также общего описания техники оптических исследований плоского напряженного состояния при постоянной нагрузке внешними силами при помощи поверхностных методов автор обсуждает шире некоторые вопросы, как технику произведения мо-

делей, явление поверхностного эффекта, эффекта отделки, технику измерений и аппаратуру.

Автор описывает проектированную им аппаратуру и приборы, являющиеся основным оборудованием оптической лаборатории. Явление поверхностного эффекта рассматривается автором — на основании проведенных автором оптических наблюдений — не только, как связанных с образующимися собственными напряжениями, но и как связанные с вторичным двойным лучепреломлением, похожим на явления «замораживания напряжений», а также с выступающим изменением коэффициента преломления света, похожего в эффекте на явление *Schlieren*.

Влияние оптической ползучести устраняется автором при помощи так называемого оптического компенсатора ползучести. По вопросу точности оптических измерений рассматривается — между прочим — влияние значения нагрузки, при неправильной нагрузке, на верность получаемых оптических образов.

S u m m a r y

THE TECHNIQUE OF PHOTOELASTIC INVESTIGATION OF PLANE STATES OF STRESS

This paper gives an outline of the photoelastic method and a general description of the technique of photoelastic investigation of plane states of stress with loads constituted by constant external forces, by means of the surface methods. Some problems are treated in detail. These are: technique of model manufacture, skin and machining effect, measurement methods, the problem of apparatus etc.

The author describes an apparatus of his own design and the instruments constituting the basic equipment for a photoelastic laboratory. In view of photoelastic experiments, the skin effect is considered by the author to be linked not only to the stress but also to the secondary orientation birefringence (resembling the phenomenon of «stress freezing») and to the change of the refraction index resembling the phenomenon known under the name of *Schlieren*.

The author suppresses the influence of optical creep by means of an optical creep compensation device.

Discussing the exactness of photoelastic measurement the author considers, among other problems, the influence of faulty loading on the exactness of the photoelastic image.

ZAKŁAD MECHANIKI OSRODKOW CIĄGLYCH
IPPT PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 22 kwietnia 1954 r.