

## METODY BADAWCZE W MECHANICE

1. Co to jest tensometria? Przedstaw podział metod tensometrycznych.

**Tensometria** (łac. tensus - napięty, gr. metreo - mierze) metoda wyznaczania naprężeń na podstawie pomiarów odkształceń materiału danej konstrukcji. Przyrządem do jej pomiaru jest tensometr. Jest to metoda punktowa, ponieważ pozwala wyznaczyć odkształcenie badanego ciała tylko w punkcie przyłożenia tensoru. Dzieli się na:

- **mechaniczne** (mechaniczne, optyczno-mechaniczne, strunowe)
- **elektryczne** (oporowe, indukcyjne, elektrodynamiczne, piezoelektryczne, pojemnościowe)

2. Napisz podstawowe równanie tensometrii oporowej i skomentuj je. Co to są rozety tensometryczne i do czego służą?

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \epsilon$$

Względna zmiana oporu drucika tensometru, gdzie  $\rho$ -oporność właściwa  $\epsilon$ -sprężyste wydłużenie  
względne  $\nu$ -liczba Poissona

**Rozeta tensometryczna**- układ kilku tensometrów (co najmniej dwóch) ułożonych bardzo blisko siebie na powierzchni badanego ciała umożliwiające jednoczesny pomiar odkształcenia. Kształt ich ułożenia powinien zredukować do minimum błąd pomiarowy wynikający ze skończonych wymiarów objętego pomiarem pola oraz uzyskać proste związki matematyczne pomiędzy odkształceniami mierzonymi obliczanymi

3. Dlaczego tensometria oporowa jest aktualnie najpowszechniej używaną metodą tensometryczną? Opisz jej zalety i wady w porównaniu do pozostałych metod.

Metoda ta wykorzystuje zmianę oporności elektrycznej materiału, z którego wykonany jest czujnik tensometryczny, przy zmianie jego wymiarów wywołanych działającymi siłami mechanicznymi. Kryterium doboru odpowiedniego tensometru musi uwzględniać warunki i wymagania pomiaru związane z rodzajem mat. kształtem elementu, rodzajem obciążenia, temp. i innymi czynnikami.

### Zalety:

- duża czułość i dokładność pomiaru: dla zakresu liniowego zwykle tensometry do  $\sigma=1000$  MPa dla stali, minimalne odkształcenie i naprężenie  $\sigma=0,2$  MPa dla stali
- pomiary są niezależne od bazy pomiarowej L, gdyż odczyt dokonywany jest bezpośrednio w jednostkach  $\epsilon=\Delta L/L$
- możliwość pomiarów statycznych i dynamicznych o dużych częstotliwościach przez długie okresy czasu
- małe wymiary i mała masa eliminująca wpływ tych wielkości na dokładność prowadzonych pomiarów – duże znaczenie w badaniach obiektów obciążonych dynamicznie.
- niewrażliwość na wstrząsy – ważne w badaniach dynamicznych
- bezpośrednie przekazywanie odkształceń na drut oporowy
- możliwość bardzo łatwego stosowania układów rozetowych – badania dwuosowego stanu naprężeń
- możliwość jednoczesnego przeprowadzania pomiaru w bardzo wielu punktach
- możliwość pomiaru na niewielkich, bardzo zakrzywionych powierzchniach
- możliwość wykonywania z jednego miejsca pomiarów na odległych od siebie przedmiotach
- możliwość dogodnego i bezpiecznego wykonywania pomiarów na trudno dostępnych i zagrażających awarią obiektach maszynowych
- możliwość przeprowadzania pomiarów na elementach ruchomych
- duża łatwość automatyzacji pomiarów i łatwość rejestracji danych
- niskie koszty produkcji

### Wady:

- wrażliwość na wilgoć i temperaturę
- niszczenie tensometru przy zdejmowaniu z badanego elementu – konieczność cechowania kontrolnego na drodze porównawczej, na wybranych tensometrach z danej partii produkcyjnej
- zjawisko histerezy (po obciążeniu odkształcenie tensometru nie wraca dokładnie do wartości zerowej) znika całkowicie po kilku cyklach obciążenia
- stosunkowo długi okres przygotowawczy – przygotowanie powierzchni badanej klejenie i suszenie mocowanie przewodów elektrycznych zabezpieczenie przed wilgocią i przypadkowym uszkodzeniem

4. W jaki sposób dokonuje się pomiarów bardzo niewielkich zmian oporności tensometrów oporowych?

W przypadku niewielkich zmian oporności stosuje się **mostek Wheatstone'a**

5. Co to jest elastooptyka? Jakie narzędzia stosuje się w elastooptyce?

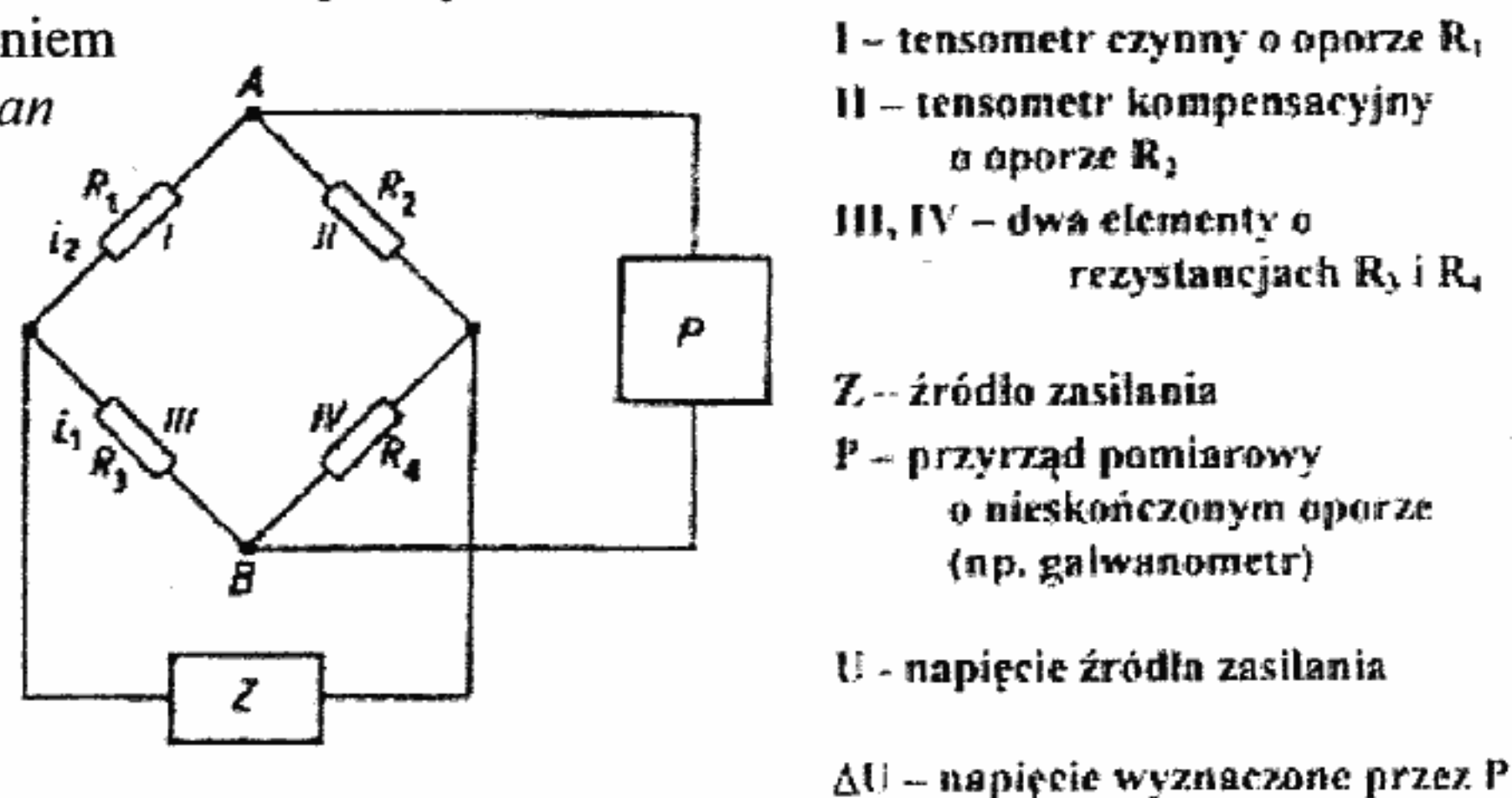
Elastooptyka zajmuje się badaniem materiałów optycznie izotropowych. Przez model przepuszcza się światło spolaryzowane, światło opuszczającego go powoduje powstanie linii wygaszeń które informują o stanach odkształcenia i naprężenia

**polaryzator** filtr optyczny powodujący polaryzację liniową światła  
**analyzer** filtr optyczny polaryzujący liniowo przechodzące przezeń światło, identyczny z polaryzatorem a różniący się jedynie położeniem w układzie optycznym polaryskopu (znajduje się za modelem)

6. Co to jest dwójłomności naturalna a co to jest dwójłomność wymuszona? Jak się je wykorzystuje w elastooptyce?

**dwójłomności naturalna** anizotropia optyczna polegająca na tym, że współczynnik załamania (a tym samym i prędkość światła) w ośrodku zależy od kierunku liniowej polaryzacji padającego światła **dwójłomność wymuszona** dwójłomność, powstała pod wpływem naprężenia (odkształcenia)

W takich mat. współczynnik załamania, tym samym prędkość światła, zależą od kierunku wektora padającego światła. Wektor światła, możemy przedstawić w postaci dwóch jego składowych: równoległa do osi "szybkiej" porusza się z większą prędkością, składowa równoległa do osi "wolnej" - z mniejszą. Wzajemne przesunięcie liniowe składowych promienia jest proporcjonalne do



$$\Delta U = U \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = U \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$



prędkości światła w powietrzu i zależy od różnicy współczynników załamania. Tak więc, przesunięcie liniowe składowych promienia jest proporcjonalne do różnicy naprężeń głównych

<druga wersja>

Dwójłomność naturalna jest to cecha charakterystyczna materiałów polegająca na rozkładaniu się spadających wektorów świetlnych na dwie składowe prostopadłe do siebie. Dwójłomność wymuszona jest to zjawisko różnego rozszczepiania wektorów promienia świetlnego w zależności od przyłożonego obciążenia; składowe światła zostają przesunięte o kąt fazowy zależny od obciążenia

7. W jaki sposób wytwarza się światło spolaryzowane liniowo, a jak spolaryzowane kołowo?

**polaryzacja liniowa** drgania wektora światła występują tylko w jednym kierunku: koniec wektora światła porusza się wzdłuż linii prostej, jeden kierunek jest wyróżniony. Uzyskuje się ją przepuszczając wiązkę światła przez specjalny filtr polaryzacyjny, w wyniku otrzymuje się falę płaską, której wektor drga w jednym kierunku a drgania składowe są zgodne w fazie.

<druga wersja> światło spolaryzowane liniowo uzyskuje się przepuszczając wiązkę światła przez polaryzator liniowy, gdzie wykorzystuje się jego dwójłomność naturalną, rozszczepia światło na składowe prostopadłe do siebie <promienie świetlne (ich kierunki) nie muszą być do siebie równoległe>; następnie jedna ze składowych zostaje pochłonięta przez polaryzator – zjaw. dichroizmu (pochłanianie selektywne); ostatecznie polaryzator opuszcza światło spolaryzowane liniowo

**polaryzacja kołowa** drgania fali świetlnej w kierunkach prostopadłych o jednakowej amplitudzie są przesunięte w fazie o ćwierć długości fali: koniec wektora światła zatacza koło, żaden z kierunków nie jest wyróżniony. Otrzymuje się za pomocą tzw. ćwierćfalówek. Jeżeli oś ćwierćfalówki, ustawionej za polaryzatorem, tworzy z osią polaryzatora kąt  $45^\circ$ , to w efekcie otrzymamy światło spolaryzowane kołowo.

<druga wersja> światło spolaryzowane kołowo otrzymuje się poprzez przepuszczenie wiązki światła przez filtr ćwierćfalowy; wykorzystuje się dwójłomność naturalną – wektory światła zostają rozłożone na składowe prostopadłe do siebie; filtr jest tak wykonany że promienie świetlne pozostają równoległe; nadejście następuje przesunięcie fazowe obu składowych o  $\pi/2$  fali przez odpowiednio dobraną dla konkretnej długości światła grubość płytki filtra

8. Co to jest polaryskop? Jakie rodzaje polaryskopów wykorzystuje się w elastooptyce?

**Polaryskop** (ława elastooptyczna) układ optyczny składający się z polaryzatora i analizatora (polaryskop liniowy, do pracy w świetle spolaryzowanym liniowo: obserwacja izoklin i izochrom) a także dodatkowo z ćwierćfalówek (polaryskop kołowy, do pracy w świetle spolaryzowanym kołowo: obserwacja izochrom)

**polaryzatory linowe** (światło monochromatyczne lub nie)

-polaryzator opuszcza światło spolaryzowane liniowo

-pochłanianie selektywne jednej z tych składowych

-wykorzystanie dwójłomności naturalnej (rozbiecie na nie koniecznie równoległe)

**filtry ćwierćfalowe** (światło monochromatyczne)

-wykorzystanie dwójłomności naturalnej (rozbiecie na równoległe)

-przesunięcie fazowe składowych o  $\pi/2$  poprzez odpowiednio dobraną dla konkretnej długości światła płytkę filtra

-polaryzator opuszcza światło spolaryzowane kołowo

9. Jakie podstawowe prawo dotyczące dwójłomności wymuszonej wykorzystuje się w elastooptyce? Napisz wzory o skomentuj je.

Z doświadczenia wiadomo, że:

$$n_1 = n_0 + c_1 \cdot \sigma_1 + c_2 \cdot \sigma_2 \quad - \text{współczynnik załamania dla składowej } A_1$$

$$n_2 = n_0 + c_2 \cdot \sigma_1 + c_1 \cdot \sigma_2 \quad - \text{współczynnik załamania dla składowej } A_2$$

$n_0$  – współczynnik załamania dla tarczy nieobciążonej

$c_1$  i  $c_2$  – bezwzględne stałe elastooptyczne

$$n_1 - n_2 = (c_1 - c_2) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) = c \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \Leftrightarrow \quad \delta = g \cdot (n_1 - n_2)$$

$$\delta = g \cdot c \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Prawo Wertheima:

$$m = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{g \cdot c}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad K_{nm} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\lambda}{g \cdot c} \quad \delta = \frac{\lambda \cdot g}{K_{\epsilon}} \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad \epsilon_1 - \epsilon_2 = m \cdot K_{nm} \quad K_{nm} = \frac{K_{\epsilon}}{g} \quad \delta = m \cdot \lambda$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = m \cdot K_{nm} \quad - \text{prawo Wertheima}$$

lub

$$\delta = \frac{\lambda \cdot g}{K} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = m \cdot K_{nm} \quad K_{nm} = \frac{K_{\epsilon}}{g}$$

10. W jakich rodzajach polaryskopów uzyskuje się izokliny i izochromy?

<Jedna wersja> dwa polaryzatory liniowe skonfigurowane tak aby dawały ciemne pole widzenia

-światło monochromatyczne (izokliny i izochromy rozróżnia się: zmieniając obciążenie modelu lub poruszając układem polaryzatora)

-światło białe (pełne wygaszenie tylko dla izoklin i częściowe (powstają kolorowe linie) dla izochrom)

dwa polaryzatory liniowe i dwie ćwierćfalówki skonfigurowane tak aby dawały ciemne pole widzenia

-światło monochromatyczne (izochromy)

-światło białe (częściowe (powstają kolorowe linie) dla izochrom)

dwa polaryzatory liniowe i dwie ćwierćfalówki skonfigurowane tak aby dawały jasne pole widzenia

-światło monochromatyczne (wygaszenie izochromy)

-światło białe (wygaszenie częściowe, powstają kolorowe linie izochrom)

<druga wersja> obserwacje izoklin umożliwiają i polaryzator liniowy i ćwierćfalówka, natomiast izochromy można obserwować tylko dzięki użyciu ćwierćfalówki

11. **izokliny** są to miejsca geometryczne punktów na powierzchni badanego modelu które wyznaczają punkty, w których kierunki główne są stałe i równoległe do osi polaryzatora skrzyżowanego z analizatorem; ciemne linie, które zmieniają się przy obrocie układu polaryzator-analizator, a nie zmieniają się przy (prostym) obciążaniu



**izochromy** to miejsca geometryczne punktów na powierzchni badanego modelu które wyznaczają punkty o jednakowej różnicy naprężeń głównych (ekstremalne naprężenia styczne) różnica ta w tych miejscach jest wielkością stałą (wielokrotnością stałej modelowej); barwne linie o kolorze zależnym od rzędu izochromy; izochromy nie zmieniają się przy obrocie układu polaryzator-analizator, a zmieniają się przy obciążeniu

**izopachy** są to miejsca geometryczne punktów na powierzchni badanego modelu które wyznaczają punkty w których suma naprężeń głównych jest wielkością stałą; w płaski stan naprężenia jest ona proporcjonalna do względnej zmiany grubości modelu

12. *W jaki sposób bada się w elastooptyce przestrzenne stany naprężeń?*

Elastooptyka (metoda badania stanu naprężeń na większych obszarach) może być stosowana tylko do obiektów płaskich (tarcz) o jednakowej grubości dając informację tylko o płaskim stanie naprężenia. Do badania przestrzennych stanów naprężeń używa się tzw. metody zamrażania stanu naprężeń

- Wykorzystuje się właściwości niektórych mat. modelowych do zachowywania w temp. pokojowej efektów dwójłomności wymuszonej uzyskanej przy obciążeniu w temp. podwyższonej
- najpopularniejsza metoda wykorzystuje efekt odwracalnej zmiany własności tworzywa w zakresie temp. kilkudziesięciu stopni; Efekt zamrażania tłumaczy się mięknieniem w podwyższonej temp. pewnych wiązań struktury tworzywa gdy pozostałe wiązanie pozostają sprężystych mat. zbudowany jest jakby z elem. sprężystych i plastycznych
- model geometryczny podobny do badanego elem. mechanicznego zostaje podgrzany do temp. wyższej od temp. zamrażania i odpowiednio obciążony. Po obniżeniu temp. poniżej temp. zamrażania i obciążeniu modeli jego odkształcenie wywołane tym obciążeniem w wyższej temp. pozostają zachowane
- model z zamrożonym stanem odkształcenia tnie się na płytki i podpłytki które bada się metodami elastooptycznymi w polaryskopach

$$\epsilon_{xM} = \frac{\sigma_{xM} - \nu_M(\sigma_{yM} + \sigma_{zM})}{E_M}$$

dla modelu

13. *W jaki sposób wyniki badań elastooptycznych otrzymane dla modeli wykonanych z mat. przezroczystych przenosi się na rzeczywiste elem. konstrukcyjne?*

Przy przenoszeniu wyników badań z modelu na rzeczywisty obiekt muszą być spełnione odpowiednie warunki którymi rządzi prawa podobieństwa modelowego. Jeżeli dla rzeczywistego modelu O i jego modelu M słuszne jest prawo Hooke'a to stan naprężeń zależy tylko od stałych mat. obiektu o modelu: E i  $\nu$  - podstawowy warunek spełnienia zależności podobieństwa. Podobieństwo fizyczne zachodzi kiedy wartości wszystkich jednoimiennych wielkości fizycznych są utrzymane w określonym stosunku k - stała podobieństwa. Musi być zachowane podobieństwo geometryczne co do kształtu i co do odkształceń. Obciążenia model muszą być identyczne co do charakteru i proporcjonalne co do wartości.

$$\epsilon_{xO} = \frac{\sigma_{xO} - \nu_O(\sigma_{yO} + \sigma_{zO})}{E_O}$$

dla obiektu rzeczywistego

14. *Na czym polega metoda kruchych pokryć?*

Metoda ta polega na pokryciu badanego elementu konstrukcyjnego cienką warstwą specjalnego tworzywa o małej wytrzymałości na rozciąganie. Pod wpływem obciążania lub odciążania badanego elementu deformuje się wraz z jego powierzchnią, kruche pokrycie ulega charakterystycznym pęknięciom. Kierunki i gęstość pęknięć pokrycia umożliwiają przybliżoną ocenę składowych naprężeń i odkształceń na badanym obszarze

15. *Jaki jest cel stosowanie metody kruchych pokryć?*

Metoda kruchego pokrycia służy jako badanie wstępne pozwalające określić w przybliżeniu kierunki naprężeń i miejsca ich spiętrzeń (dokładność metody wynosi 10-20%) Dokładne metody badań tensometrycznych są czasochłonne i kosztowne więc dość często stosuje się metodę kruchych pokryć

16. *Co to są izostaty i izoentaty w metodzie kruchych pokryć?*

Izostatami nazywamy linie pęknięcia wskazujące trajektorie naprężeń głównych występujących na powierzchni danego elementu. Izoentaty są to linie stanowiące miejsca geometryczne końców pęknięć przy danym obciążeniu badanego obiektu

17. *Na czym polega zjawisko mory?*

Na nałożeniu na siebie w jednej płaszczyźnie dwu powtarzalnych struktur geometrycznych (np. linii) powoduje powstanie trzeciej struktury w postaci układu jasnych i ciemnych prążków, które nazwane są obrazem mory.

18. *Jak zjawisko mory wykorzystywane jest w badaniach stanu odkształceń i naprężeń?*

Metoda mory w badaniach odkształceń polega na ściśnięciu z powierchnią badanego przedmiotu siatki zwanej siatką roboczą lub odkształceniową oznaczaną SO. obserwacji siatki SO przez drugą siatkę zwaną siatką wzorcową (SW). w wyniku nałożenia siatek SO i SW powstaje pewien obraz mory SO ulega odkształceniom identycznym z odkształceniami powierzchni z którą jest związana SW jest cały czas nieruchoma lecz obraz mory ulega zmianą które są dużo większe niż odkształcenia powierzchni które to wywołały. Na podst. wielkości i rodzaju zmiany obrazu można obliczyć odksz. powstałe na powierzchni

19. *Jakie sposoby nanoszenia siatek roboczych stosuje się w metodzie mory? Jakie są metody rejestracji obrazów mory?*

Siatki na powierzchni badanych elementów nanosi się głównie dwoma sposobami:

- naklejanie specjalnej dwuwarstwowej błony ze sfotografowaną i utrwaloną siatką, a następnie zdarcie lub rozpuszczenie warstwy nośnej błony, tak że na badanej powierzchni zostaje tylko warstwa emulsji z utrwaloną siatką
- rozprowadzanie na badanej powierzchni emulsji światłoczułej poprzez zanurzenie próbki lub pomalowanie, sfotografowanie stykowe siatki wzorcowej i jej utrwalenie

Jeśli chodzi o sposoby rejestracji obrazów mory to wyróżniamy 3 podst. sposoby:

- fotografowanie bezpośrednio w czasie próby obserwowanego obrazu mory, otrzymywanego przez nałożenie siatki wzorcowej bezpośrednio na badaną powierzchnię lub na matówkę aparatu fotograficznego
- dwukrotne fotografowanie siatki (przed i po odkształceniu) na tym samym negatywie
- fotografowanie siatki przed odkształceniem, i po odkształceniu, a następnie nałożenie negatywów w odpowiedniej skali na siebie lub siatkę wzorcową