

MODELOWE BADANIA KONCENTRACJI NAPRĘŻEŃ W WĘZŁACH
USTROJÓW NOŚNYCH METODĄ POKRYĆ OPTYCZNIE CZYNNYCH¹

HENRYK KOPECKI, MACIEJ KOPKOWICZ, JAN SMYKLA (RZESZÓW)

1. Wstęp

Dążenie do tworzenia konstrukcji o coraz większej trwałości przy jednoczesnej tendencji zmniejszania ich ciężaru i kosztów, wymaga od współczesnego konstruktora poszukiwania optymalnych metod projektowania. Jednym z przejawów tegoż procesu optymalizacji jest bieżąca weryfikacja eksperymentalna proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w sytuacjach, gdy złożoność kształtów konstrukcji bądź uniemożliwia opracowanie adekwatnego modelu matematycznego, bądź daje możliwość jedynie przybliżonych obliczeń.

Weryfikacja eksperymentalna polegająca na zrealizowaniu w metalu projektowanego ustroju nośnego względnie jego podstawowych elementów, a następnie poddaniu go badaniom wytrzymałościowym może okazać się wysoce kosztowna i czasochłonna, niekiedy wręcz niemożliwa.

Poszukiwanie szybkich, dokładnych, a jednocześnie tanich metod, które mogą być stosowane w trakcie kształtowania struktury nośnej, gdy istotnych zmian konstrukcyjnych można dokonać przed kosztownym i pracochłonnym procesem wykonawczym prototypowego rozwiązania, zwracają uwagę konstruktorów na coraz szerzej rozwijane metody elastooptyki, a wśród nich na metodę modelową określaną w literaturze metodą „MODELTECH” [1] niezwykle przydatną do analizy dwuwymiarowych stanów naprężenia.

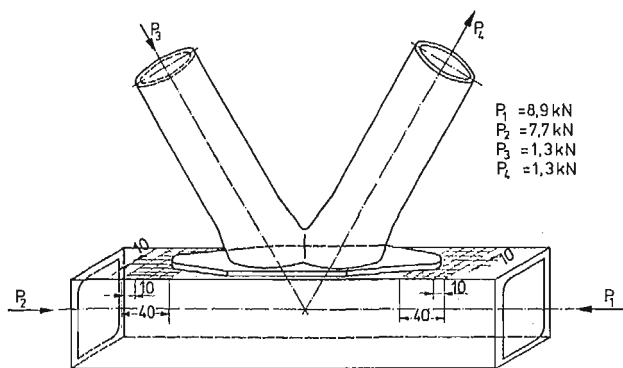
Istota tej metody polega na wykonywaniu modelu konstrukcji badanej z tworzywa sztucznego z dodatkiem pyłu aluminiowego. Kompozycja taka przy odpowiednim doborze proporcji wagowych obu składników wykazuje doskonałe własności odlewnicze w stanie niespolimeryzowanym, zaś po całkowitym spolimeryzowaniu jest łatwa do obróbki mechanicznej. Istotne znaczenie posiada tutaj fakt, że materiał ten w procesie polimeryzowania przechodzi przez fazę doskonale plastyczną. W tym stanie daje się on łatwo kształtować w sposób dowolny. Ukształtowaną pod względem geometrycznym konstrukcję (po całkowitym spolimeryzowaniu tworzywa) okleja się warstwą optycznie czynną, przy czym klejem jest tutaj materiał modelu. Ponieważ moduł sprężystości podłużnej materiału modelowego jest kilkadziesiąt razy mniejszy od modułu metali, zatem przy zach-

¹) Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego

Warszawa 4-6 września 1978

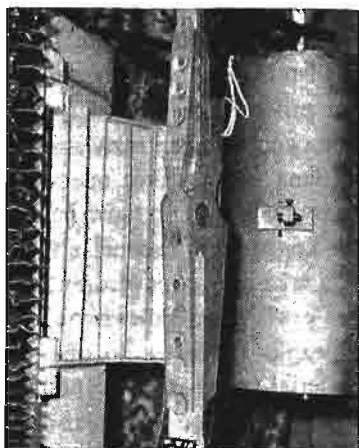
waniu podziałki 1:1 dla modelu, siły obciążające odpowiadające danemu przypadkowi obciążenia są kilkudziesięciokrotnie mniejsze od sił obciążających konstrukcję rzeczywistą.

Przygotowany w ten sposób do badań model nie jest wrażliwy na zmianę temperatury w tym sensie, że ze względu na identyczny współczynnik rozszerzalności liniowej materiału modelu i powłoki optycznie czynnej, zmiana temperatury nie wywołuje różnego od neutralnego obrazu izochrom w konstrukcji nieobciążonej.



Rys. 1. Schemat statyczny węzła kratownicy

W niniejszej pracy przedstawimy wyniki eksperymentalnych badań modelowych dwóch silnie obciążonych węzłów o złożonych kształtach geometrycznych: węzła kratownicy przestrzennej²⁾ oraz węzła połączenia skrzydło środkowe — skrzydło doczepne sa-



Rys. 2. Węzeł mocowania skrzydła środkowego ze skrzydłem doczepnym samolotu M-18 „Dromader” w stanie zmontowanym

molotu M-18 „Dromader”.

Modele badanych konstrukcji wykonano w podziałce 1:1, w oparciu o krajowe tworzywa sztuczne. Przedstawimy również zagadnienie multiplikacji izochrom, dokonane za pomocą EMC.

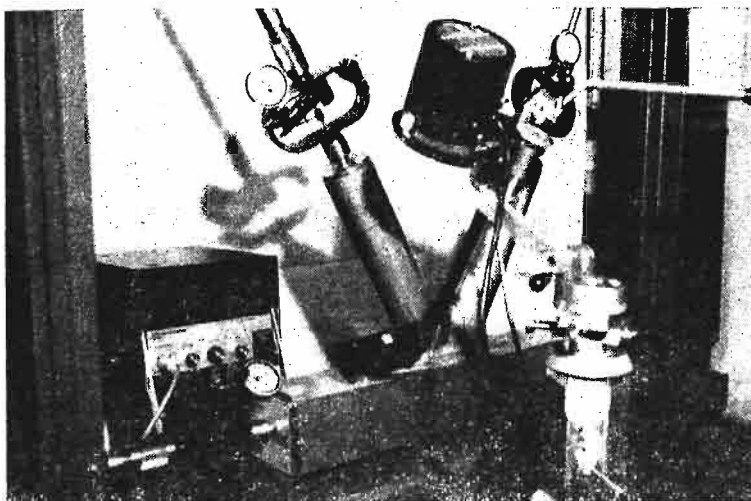
²⁾ Geometria oraz obciążenia zewnętrzne odpowiadają węzłowi ramownicy przestrzennej rzeczywistej konstrukcji.

2. Przygotowanie modeli do badań

Modele wykonano metodą odlewania z kompozycji epidian 53 z dodatkiem 3% pyłu aluminiowego (wagowo) oraz 12% utwardzacza Z1. Formy odlewnicze ukształtowano w ten sposób, by wymiary nominalne uzyskać po naklejeniu warstwy optycznie czynnej, której grubość w rozważanym przypadku wynosiła 1,5 mm.

Odtwarzając geometrię węzła kratownicy uwzględniono fakt, że element poziomy węzła (rura o przekroju zbliżonym do kwadratowego) w konstrukcji rzeczywistej uzyskiwana jest z dwóch kątowników połączonych w narożach spoiną.

Jak wykazały badania, fakt ten posiada istotne znaczenie bowiem konstrukcja nie posiadając płaszczyzny symetrii, wykazuje w obszarach niewralgicznych zróżnicowane rozkłady naprężeń. Geometrię obu modeli odtworzono w szczególach, łącznie z wymodelowaniem spoin, występujących w węźle kratownicy.



Rys. 3. Węzeł kratownicy przestrzennej po zamontowaniu na stanowisku badawczym

Ze względu na zachowanie wspomnianej podziałki 1:1, ustalenia obciążeń dla modeli dokonano na podstawie znajomości modułów sprężystości podłużnej materiału modelu oraz materiału konstrukcji rzeczywistych (stal).

$$\text{Iloraz mdułów wynosił}$$

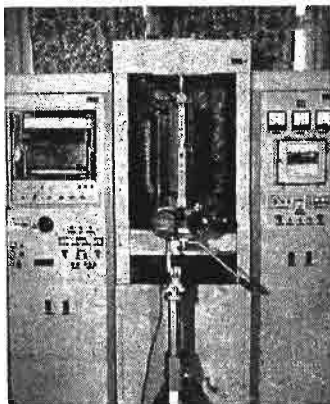
$$E = \frac{E \text{ stali}}{E \text{ mat.mod.}} = 75$$

Przyjęto zatem 75-krotnie mniejsze siły obciążające modele, w stosunku do sił obciążających węzły konstrukcji rzeczywistych. Charakter obciążeń zewnętrznych węzłów odpowiadał przypadkom wymiarującym, przy czym pomiarów dokonywano przy obciążeniach odpowiadających około 50% obciążeń dopuszczalnych jeśli chodzi o węzeł kratownicy, zaś w przypadku badania modelu węzła samolotu M-18, badania przeprowadzono dla dwóch poziomów obciążenia: 4,6 kN oraz 6 kN.³⁾

³⁾ Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie takiej wersji węzła, która charakteryzowałaby się równomiernym rozkładem naprężeń w okolicy sworzni śrubowych. Z tego względu, nie dokonywano rozdzielania składowych stanu naprężenia, ograniczając się do oceny poprawności pracy złącza na podstawie rozkładu izochrom. Sworznie w badanym złączu wykonane były również z materiału modelowego.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają fotografie modeli węzła kratownicy oraz węzła połączenia skrzydeł przygotowanych do badań.

Badania przeprowadzono przy użyciu polaryskopu refleksyjnego firmy „Photolastic” (model 131) wyposażonego w kompensator Soleil-Babinet (model 532) oraz przystawkę do skośnego prześwietlania (model 033 wg oznaczeń firmy „Photolastic”).



Rys. 4. Węzeł mocowania skrzydeł samolotu M-18 „Dromader” zamocowany w szczękach maszyny wytrzymałościowej 1231-U-10

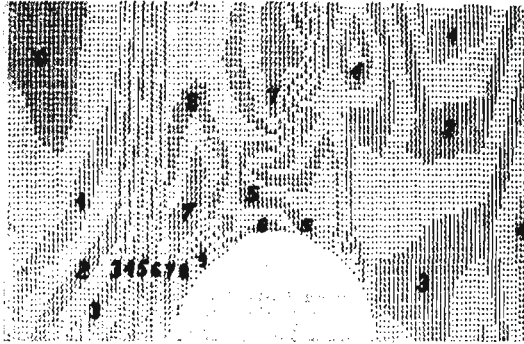
3. Wyniki badań

Ze względu na to, że metodyka badań elastoptycznych z wykorzystaniem światła odbitego była wielokrotnie omawiana w szeregu pracach (np. [2], [3]), dlatego też omawiając wyniki badań ograniczymy się do zwrócenia uwagi na niektóre szczegóły metodyczne — związane z dokładnością pomiarów, a ściślej, z formą prezentowania wyników pomiarów. Mamy tu na uwadze problem kompensacji naprężeń, który nabiera szczególnego znaczenia w tych przypadkach, w których wartości rzędu izochromy w obszarze badanym nie przewyższają pierwszego rzędu. W takich sytuacjach dokumentowanie rozkładu izochrom metodą fotograficzną jest zupełnie nieskuteczne.

Skuteczną natomiast wydaje się forma przedstawiania wyników zaprezentowana w niniejszej pracy, polegająca na sporządzaniu map obrazujących obszary stałych poziomów izochrom, izoklin, składowych stanu naprężenia, czy też naprężeń zredukowanych. Mapy te mogą być drukowane z dowolną dokładnością, bowiem można wzmiankowane poziomy drukować dowolną ilością znaków (cyframi lub literami). Mając wczytane wyniki pomiarów (zarówno z prześwietlania normalnego jak i skośnego) maszyna cyfrowa samoczynnie dokonuje podziału zakresu pomiarowego na żądaną liczbę drukowanych poziomów. Istnieje ponadto możliwość dalszego lokalnego multiplikowania wyników badań. W ten sposób można wyniki badań w obszarach o silnych gradientach naprężeń a jednocześnie niskich poziomach rzędu izochromy przedstawić bardziej przejrzysto.

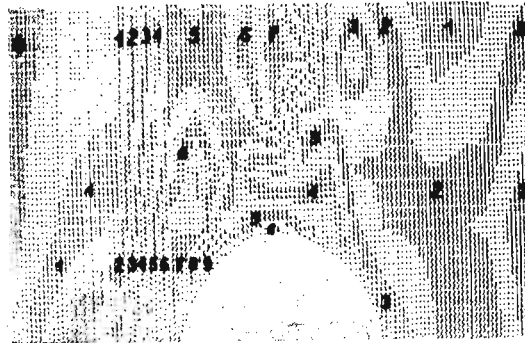
Zaprezentowany sposób przedstawiania wyników pomiarów odpowiada znanej, stosowanej w świetle przechodzącym, multiplikacji izochrom. Dokładność prezentowanej

formy zapisu wyników pomiarów uzależniona jest od dokładności odczytów w procesie kompensacji. Drugim czynnikiem wpływającym na zgodność graficzną obrazu rzeczywistego izochrom i wydruku sporządzonego przez EMC jest liczba punktów pomiarowych, które należy zagęszczać w obszarach koncentracji naprężeń.



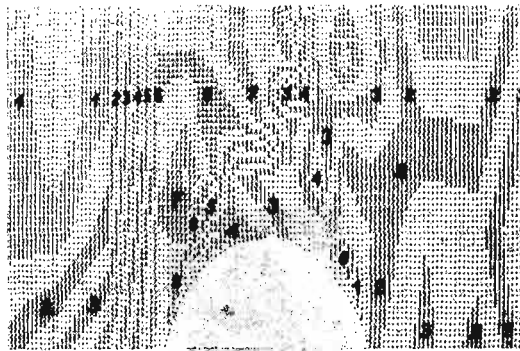
Rys. 5. Mapa rozkładu składowej stanu naprężenia σ_1 w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

- 0 1,48 ÷ 1,65 MPa
- 1 2,00 ÷ 2,35 „
- 2 2,69 ÷ 3,04 „
- 3 3,38 ÷ 3,73 „
- 4 4,07 ÷ 4,42 „
- 5 4,80 ÷ 5,11 „
- 6 5,45 ÷ 5,80 „
- 7 6,15 ÷ 6,50 „
- 8 6,90 ÷ 7,20 „
- 9 7,53 ÷ 7,70 „



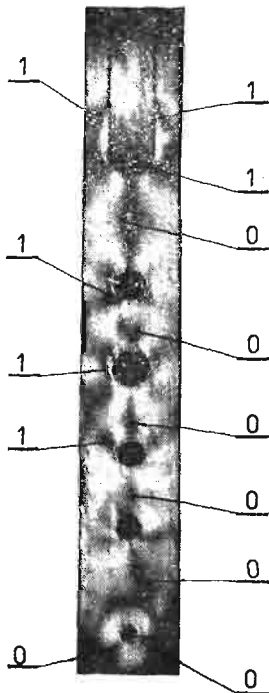
Rys. 6. Mapa rozkładu składowej stanu naprężenia σ_2 w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

- 0 -1,96 ÷ -1,75 MPa
- 1 -1,33 ÷ -0,913 „
- 2 -0,495 ÷ -0,077 „
- 3 0,341 ÷ 0,758 „
- 4 1,18 ÷ 1,60 „
- 5 2,01 ÷ 2,43 „
- 6 2,85 ÷ 3,26 „
- 7 3,68 ÷ 4,10 „
- 8 4,52 ÷ 4,94 „
- 9 5,35 ÷ 5,56 „

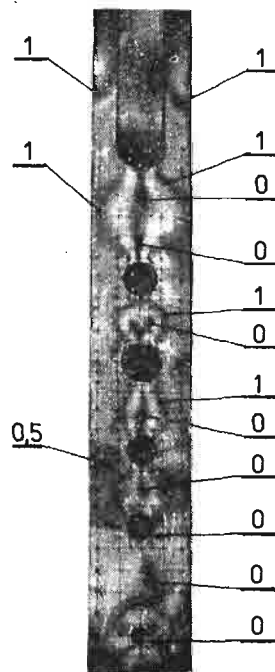


Rys. 7. Mapa rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy H—M—H w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

- 0 1,98 ÷ 2,11 MPa
- 1 2,39 ÷ 2,66 „
- 2 2,93 ÷ 3,21 „
- 3 3,48 ÷ 3,75 „
- 4 4,02 ÷ 4,30 „
- 5 4,56 ÷ 4,84 „
- 6 5,11 ÷ 5,40 „
- 7 5,66 ÷ 5,96 „
- 8 6,20 ÷ 6,50 „
- 9 6,75 ÷ 6,88 „



Rys. 8. Obraz izochrom w obszarze sworzni węzła mocowania skrzydeł samolotu M-18, przy obciążeniu siłą osiową 4,6 kN



Rys. 9. Obraz izochrom w obszarze sworzni węzła mocowania skrzydeł samolotu M-18, przy obciążeniu siłą 6 kN

W obu rozważanych konstrukcjach, najwyższa wartość rzędu izochromy (w świetle normalnym) nie przewyższała 1,5.

Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono wyniki badań w obszarze newralgicznym (zaznaczonym na rys. 1 w formie siatki) węzła kratownicy przestrzennej. Rys. 5 i 6 przedstawiają odpowiednio mapy składowych σ_1 i σ_2 , zaś na rys. 7 podane są poziomy wyteżenia wg hipotezy H—M—H.⁴⁾

Rys. 10. Mapa rozkładu izochrom w obszarze węzła samolotu M-18 identycznym jak na rys. 8 przy obciążeniu siłą 4,6 kN

0	— 0	÷ 0,042
1	— 0,125	÷ 0,208
2	— 0,291	÷ 0,375
3	— 0,458	÷ 0,542
4	— 0,62	÷ 0,71
5	— 0,79	÷ 0,87
6	— 0,96	÷ 1,04
7	— 1,12	÷ 1,21
8	— 1,29	÷ 1,37
9	— 1,46	÷ 1,5



Rysunki 8 i 9 przedstawiają obrazy izochrom w obszarze newralgicznym węzła skrzydeł samolotu M-18 „Dromader”. Rys. 8 ukazuje rozkład izochrom w obszarze sworzni śrubowych, przy obciążeniu węzła siłą osiową równą 4,6 kN. W tym stanie obciążenia dokonano pomiaru ułamkowych rzędów izochrom.

⁴⁾ Przedstawione rezultaty, stanowią niewielki fragment obszernych badań, którymi objęte były 4 różne pod względem geometrycznym wersje rozwiązań konstrukcyjnych rozważanego węzła kratownicy. Przedstawiona wersja jest oryginalnym rozwiązaniem autorów.

Zwielokrotnione metodą komputerową wyniki pomiarów izochrom przedstawiono na rys. 10. (Cyframi od 0÷9 oznaczono poziomy ułamkowych wartości rzędów izochrom).

Na rysunku 9 przedstawiono obraz izochrom dla okucia obciążonego siłą osiową 6 kN.

4. Wnioski ~

W pracy przedstawiliśmy wyniki oraz omówiliśmy niektóre zagadnienia związane z przygotowaniem do badań modelowych węzłów ustrojów nośnych o złożonych kształtach, wykonanych w skali 1:1.

Wskazaliśmy na pełną przydatność krajowych żywic epoksydowych jako materiałów do wykonywania modeli do badań. Wyniki (będące fragmentem rezultatów obszerniejszych badań) potwierdzają przydatność zaprezentowanego sposobu badań, jako skutecznego narzędzia do ujawniania nieprawidłowości konstrukcyjnych.

Zaprezentowaliśmy komputerową metodę multiplikacji izochrom. Podobieństwo obrazu izochrom (por. np. rys. 8 i 10) pozwala stwierdzić, że nawet przy niskich wartościach rzędów izochrom (poniżej 0,5) istnieje możliwość ilościowej analizy stanu naprężenia.

Literatura cytowana w tekście

1. *Modeltech, a new technique in stress and design analysis with aluminium filled epoxy models*. Photoelastic Inc. Bulletin MT-011-1.
2. J. STUPIŃSKI, *Pomiary naprężeń metodą elastoptycznej warstwy powierzchniowej*, Archiwum Budowy Maszyn, 16, 3 (1969).
3. Z. ORŁOŚ i inni — *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, PWN Warszawa 1977.

Резюме

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКИ ДЕЯТЕЛЬНЫХ

В настоящей работе представлены результаты модельных исследований высоконагруженных узлов несущих систем.

Исследования проводились методом фотоупругости, имеющим названием „Модельтех”. Действительная конструкция заменена моделью в масштабе 1:1, изготовленной из пластмассового состава с примесью алюминиевой пыли, оклеенной слоем оптически деятельным.

Результаты исследований демонстрируются в виде карт иллюстрирующих распределение составляющих состояния напряжения и натяжения в чувствительных зонах.

S u m m a r y

INVESTIGATION OF THE STRESS CONCENTRATIONS IN JOINTS OF STRUCTURES
BY THE „MODELTECH” METHOD

Results of the investigation of the stress concentrations in joints of structures using „Modeltech” method are presented in the paper. The method consists in stress and design analysis by means of full scale models made of epoxy with aluminium powder. Photoelastic coatings methods is used to analyse the stress field. Distributions of the stress components are given in the form of the maps.

POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 9 marca 1979 r.
