

Ludomir Jankowski, Lech J. Engel, Jerzy Jasieńko

# Praca statyczna wybranych połączeń występujących w drewnianych obiektach historycznych

## 1. Wprowadzenie

W przedstawionych badaniach pracy statycznej wybranych połączeń historycznych bazowano na elastoptyce. Badania elastoptyczne przeprowadzono na wykonanych w tym celu modelach, dla połączeń elementów prętowych na czop i jaskółczy ogon, powszechnie stosowanych w konstrukcjach drewnianych obiektów historycznych. Są to połączenia:

- wieszaka z tramem na czop (rys. 1),
- krokwi z jętką na jaskółczy ogon (rys. 2),

oraz połączenia na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej:

- krokwi z zastrzałem (rys. 3),
- storczyka z mieczami (rys. 4),
- tramu z mieczami (rys. 4).

W badaniach rozpatrywano przypadki połączenia elementów z użyciem: trzpienia drewnianego, trzpienia stalowego i bez użycia trzpienia przez docisk czopu w kształcie jaskółczego ogona do gniazda. Badania metodami elastoptycznymi przeprowadzono na wykonanych w tym celu modelach, dokumentując wyniki na zdjęciach fotograficznych wykonywanych w trakcie badań oraz sporządzając zbiorcze wykresy izochrom, będące liniami łączącymi punkty o jednakowych odkształceniach.

Badania wykonano na modelach wyciętych z płyty odlanej z kompozycji epoksydowej. Do celów badań elastoptycznych wykorzystano stanowisko badawcze przedstawione na rys. 5, a badanie wykonano polaryskopem typu V.

Do analizy pracy połączeń wykorzystano izochromy uzyskane za pomocą badań elastoptycznych przeprowadzonych na modelach elementów konstrukcyjnych wykonanych z materiałów przezroczystych, wykorzystując zjawisko polaryzacji światła i dwójłomność wymuszoną materiału. Zarejestrowany obraz izochrom zawiera informację o różnicy naprężeń głównych występujących w analizowanym obszarze. Modele badanych elementów są wykonane z kompozycji epoksydowej, materiału izotropo-

wego, co nie pozwala bezpośrednio ekstrapolować wyników na materiał anizotropowy, jakim jest drewno.

Analizę numeryczną wszystkich badanych połączeń wykonano przy użyciu środowiska programu COSMOS/M2.5, który wykorzystuje MES. Przy modelowaniu numerycznym dla elementów więźby (krokwie, jętki, tram) wykorzystano element bryłowy 3-D (SOLID). Do połączeń wykorzystano element modelujący szczelinę i tarcie (GAP). Przebadano połączenia na czop uwzględniając przy ścisaniu dwa modele połączeń: z trzpieniem i bez trzpienia oraz przy rozciąganiu jeden model połączeń. Przebadano połączenia na jaskółczy ogon uwzględniając trzy modele połączeń: bez trzpienia o sile przenoszonej przez docisk czopa do gniazda, z trzpieniem drewnianym przenoszącym całe obciążenie oraz z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem. Analizę numeryczną wykonano dla tych samych połączeń, dla których wykonano badania elastoptyczne.

W badanych połączeniach przyjęto oś x jako równoległą do osi tramu i jętki.

Do analizy numerycznej przyjęto następujące parametry wytrzymałościowe:

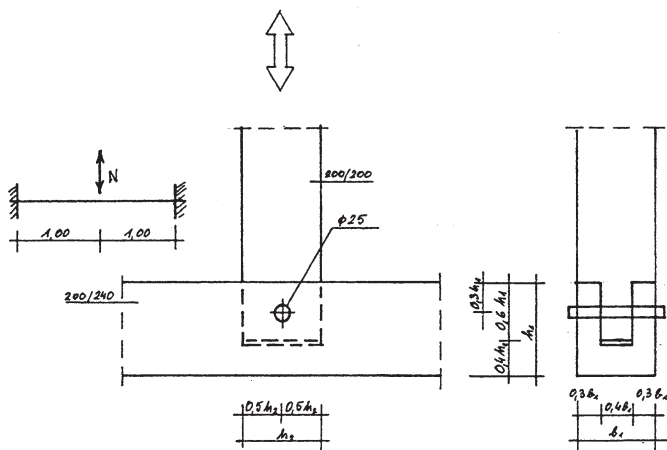
$$\begin{array}{lll} E_x = 13200 \text{ MPa} & G_{xy} = 1070 \text{ MPa} & \nu_{xy} = 0,064 \\ E_y = 1082 \text{ MPa} & G_{yz} = 425 \text{ MPa} & \nu_{yz} = 0,033 \\ E_z = 2032 \text{ MPa} & G_{xz} = 1175 \text{ MPa} & \nu_{xz} = 0,560 \end{array}$$

wsp. tarcia:  $\mu = 0,5$

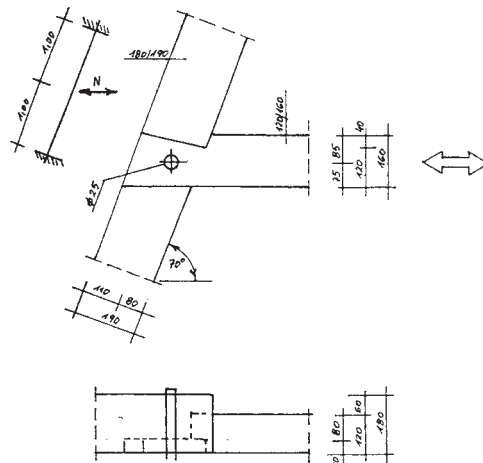
## 2. Badania elastoptyczne

Celem badań elastoptycznych była analiza połączenia na czop i gniazdo oraz połączeń na jaskółczy ogon. W połączeniu na czop i gniazdo badania przeprowadzono przy ścisaniu dla połączenia na czop i gniazdo bez udziału trzpienia i na trzpień drewniany, a przy rozciąganiu na trzpień drewniany. W połączeniach na jaskółczy ogon badania przeprowadzono przy rozciąganiu dla połączeń: na trzpień drewniany współpracujący z połączeniem czopa z gniazdem, trzpień stalowy współpracujący z połączeniem czopa z gniazdem oraz dla czopa z gniazdem bez trzpienia.

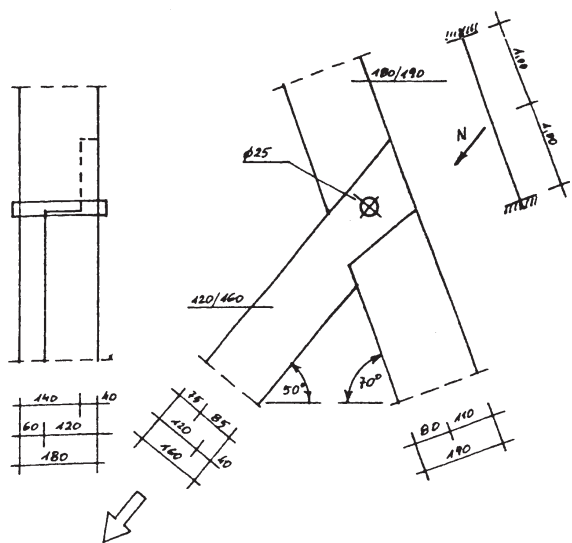
*Praca dopuszczona do druku po recenzjach*



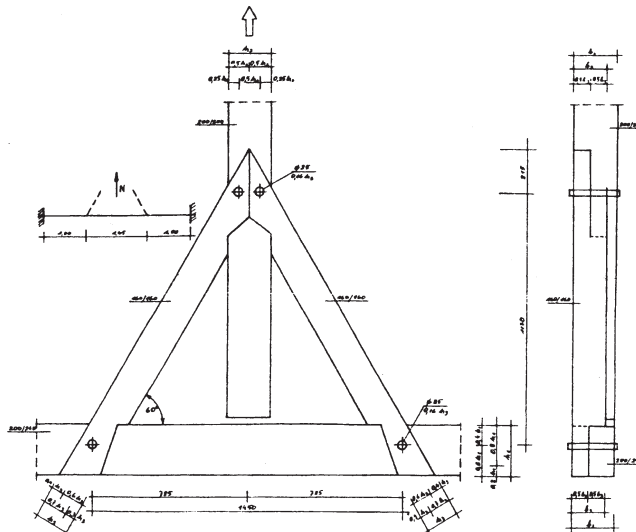
Rys. 1. Połączenie wieszaka z trzem na czop



Rys. 2. Połączenie krokwi z jętką na jaskółczy ogon



Rys. 3. Połączenie krokwi z zastrzałem



Rys. 4. Połączenie storczyka z mieczami i tramu z mieczem

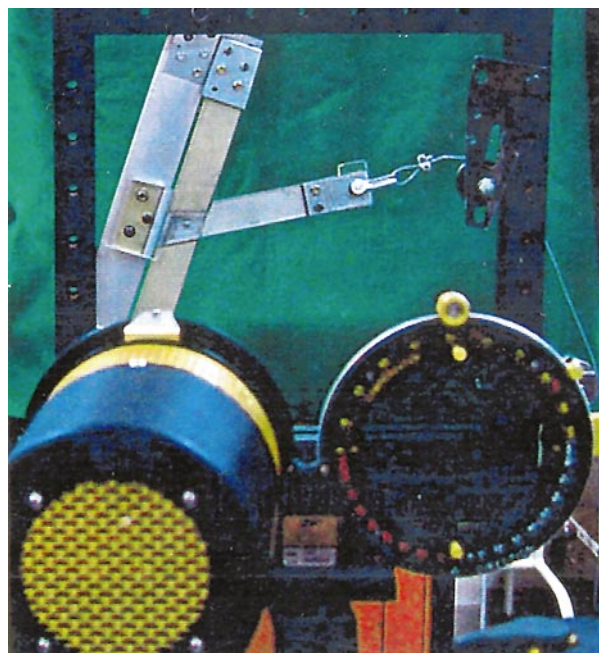
W trakcie pomiarów zarejestrowano układ izochrom całkowitych i połówkowych, w połączeniach badanych elementów. Przyjęto zasadę nie przekroczenia obciążeń powodujących powstanie izochrom o rzędach wyższych niż  $m = 5,0 - 6,0$ , by nie spowodować zniszczenia modeli. Występujące w połączeniach na jaskółczy ogon wstępne efekty optyczne należy wiązać ze skręcaniem elementów w wyniku mimośrodkowych obciążeń.

Celem badań była analiza jakościowa efektów przejawiających się zmianami w układach izochrom i rozkładach odkształceń oraz naprężeń. Obrazy uzyskane z badań modelowych pokazują rozkłady odkształceń i naprężeń oraz proces ich piętrzenia.

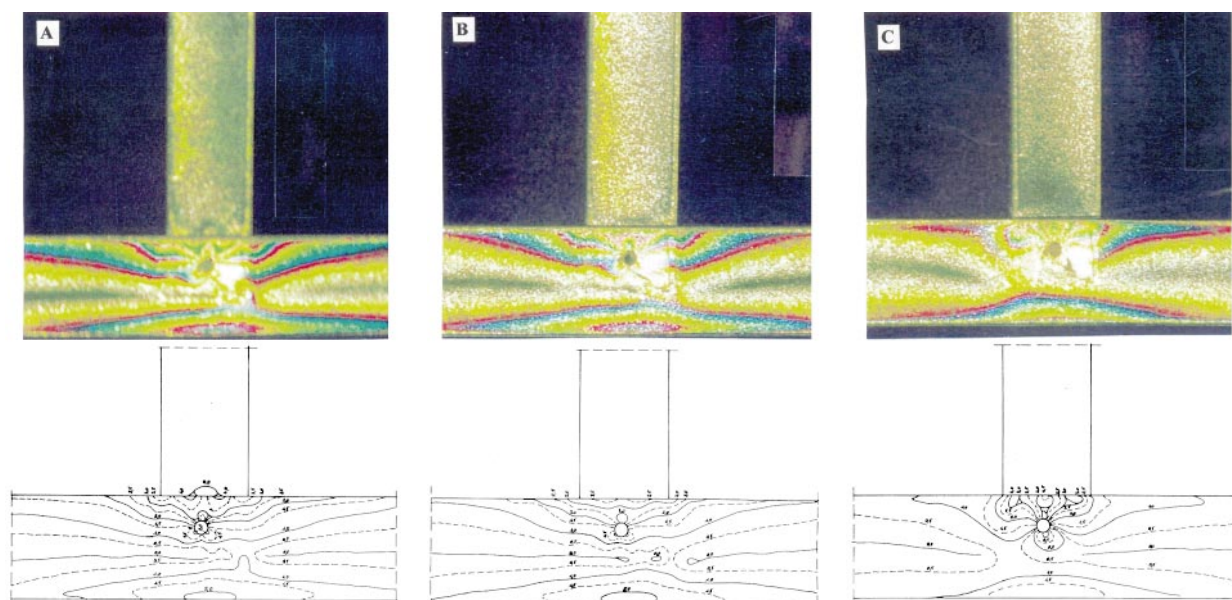
Na podstawie wykonanych w trakcie prowadzenia badań zdjęć fotograficznych, dla wszystkich badanych przypadków sporządzono wykresy pokazujące układ izochrom całkowitych i połówkowych. Na załączonych rysunkach ograniczono się do przedstawienia zdjęć fotograficznych izochrom całkowitych, pomijając wykonane zdjęcia izochrom połówkowych.

Omówienie wyników badania poszczególnych połączeń:

1. Połączenie wieszaka z trzem na gniazdo i czop (rys. 6):
  - przy ściskaniu w połączeniu z trzpieniem drewnianym izochromy koncentrują się wokół trzpienia oraz między trzpieniem a płaszczyzną styku elementów i w re-

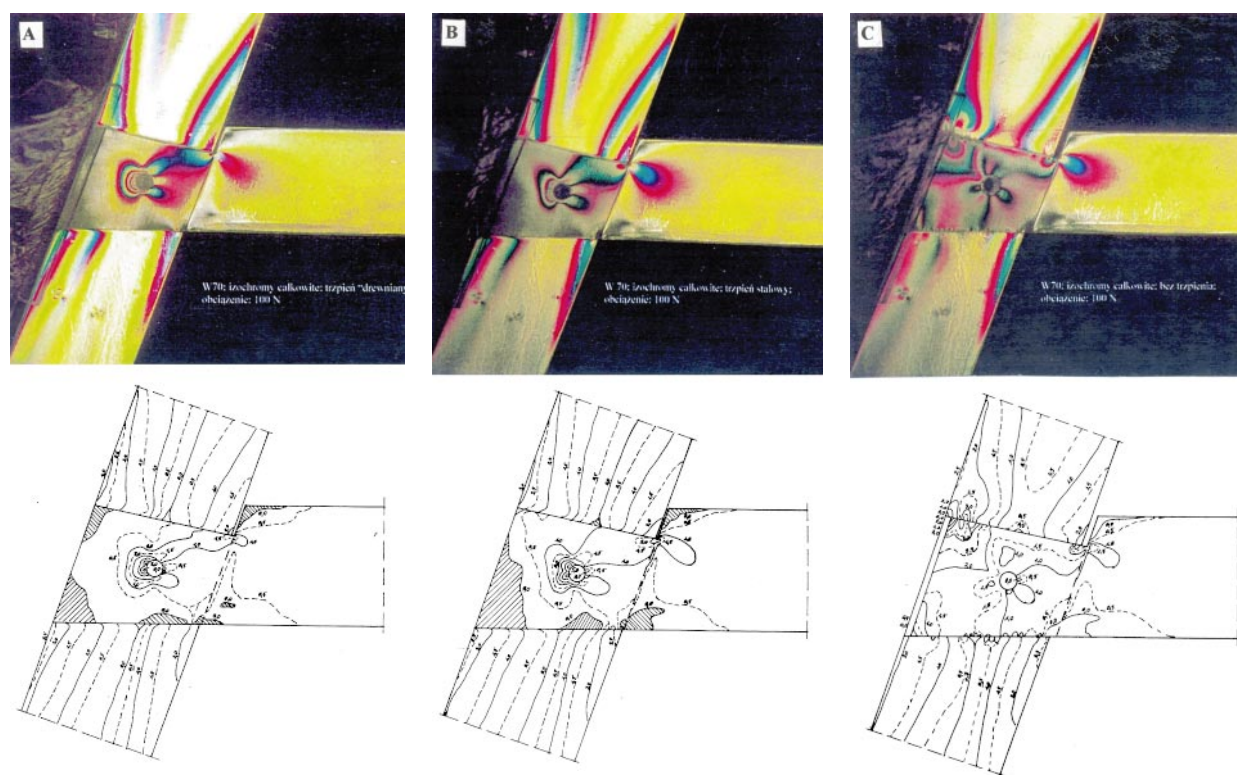


Rys. 5. Stanowisko do modelowych badań elastooptycznych, z badanym modelem, na pierwszym planie polaryskop typu V



Rys. 6. Połączenie wieszaka z trzem na gniazdo i czop.

A – ściskanie – połączenie z trzpieniem drewnianym, B – ściskanie – połączenie bez trzpienia, C – rozciąganie – połączenie z trzpieniem drewnianym



Rys. 7. Połączenie krokwi z jętką na jaskółczy ogon – rozciąganie:

A – połączenie z trzpieniem drewnianym, B – połączenie z trzpieniem stalowym, C – połączenie bez trzpienia

jonie tej płaszczyzny uzyskują maksymalne wartości (4,0). Świadczy to że obciążenia są przenoszone przede wszystkim przez docisk elementów, a w mniejszym stopniu przez trzpień drewniany. W połączeniu bez trzpienia obciążenia są przenoszone przez docisk mię-

dzy elementami i izochromy uzyskują tu wartość 3,5, przy czym występują zakłócenia w przebiegu izochrom w rejonie otworu na trzpień,  
– przy rozciąganiu w połączeniu z trzpieniem drewnianym izochromy koncentrują się wokół trzpienia oraz



między trzpieniem a płaszczyzną styku elementów, osiągając znaczne wartości (4,5).

2. Połączenie rozciągane krokwi z jętką na jaskółczy ogon (rys.7):
  - w połączeniach z trzpieniem drewnianym i trzpieniem stalowym izochromy koncentrują się przy trzpieniu od strony przeciwnej niż działanie siły, a ich przebieg w obu przypadkach, zarówno w czopie jaskółczego ogona, w jętce i krokwi jest podobny. Maksymalne wartości izochrom (5,0) są identyczne bezpośrednio przy trzpieniach. Układ i wartości izochrom wskazują, że trzpienie przenoszą większość obciążenia,
  - w połączeniu bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenosi czop i gniazdo połączenia, czop jętki znacznie przemieścił się zgodnie z kierunkiem działania siły. Izochromy koncentrują się wzdłuż obu krawędzi połączenia, uzyskując maksymalną wartość w narożu górnym jaskółczego ogona (6,0) i w krokwi (3,5).
3. Połączenie rozciągane krokwi z zastrzałem na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 8):
  - w połączeniach z trzpieniem drewnianym i trzpieniem stalowym układ i koncentracja izochrom, jak i ich maksymalne wartości są niemal identyczne jak w połączeniu krokwi z jętką (5,0),
  - w połączeniu bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenosi czop i gniazdo, przemieszczenie czopa, układ i koncentracja izochrom oraz ich maksymalne wartości są podobne jak w połączeniu krokwi z jętką – w czopie (6,0) i znacznie większe w krokwi (6,0).
4. Połączenie rozciągane storczyka z mieczami na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 9):
  - w połączeniach z trzpieniami drewnianymi izochromy koncentrują się przy trzpieniach od strony przeciwnej niż działanie siły, a ich maksymalne wartości wynoszą: przy trzpieniu lewym 3,0 i prawym 4,0. Znacznie mniejsze wartości izochrom występują wzdłuż krawędzi styku elementów (0,5 – 1,0), co wskazuje że gros siły przenoszą trzpienie. Różny przebieg izochrom i różne ich maksymalne wielkości w obu mieczach, mają przyczynę w niesymetrycznym obciążeniu mieczy, wynikającym z trudności wykonania idealnie symetrycznego modelu konstrukcji,
  - w połączeniach bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenoszą czopy i gniazda połączenia, czopy mieczy przemieściły się wysuwając się z gniazda, przy czym wielkość przemieszczenia jest różna w obu mieczach. Siła działająca pionowo na połączenie, nie wzdłuż osi mieczy, powoduje ich przemieszczenie w gniazdach połączone z obrotem. Wielkość przemieszczenia i obrotu zależy od wielkości siły oraz dopasowania powierzchni styku elementów. W obu mieczach izochromy koncentrują się wzdłuż obu krawędzi połączenia, uzyskując maksymalne wartości w narożach dolnych płaszczyzn styczności (6,0). Zakłócenia w przebiegu izochrom występują przy otworach na trzpienie. W obu mieczach jest różny przebieg izochrom, co ma przyczynę w różnych przemieszczeniach i obrotach mieczy.
5. Połączenie rozciągane tramu z mieczami na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 10):
  - w połączeniu z trzpieniem drewnianym układ i koncentracja izochrom jest podobna jak w połączeniu krokwi z jętką, a ich maksymalne wartości są mniejsze (4,0),
  - w połączeniu bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenosi czop i gniazdo połączenia, czop miecza znacznie przemieścił się wysuwając z gniazda. Izochromy kon-

centrują się wzdłuż obu krawędzi połączenia, uzyskując maksymalną wartość w narożu dolnym jaskółczego ogona (5,0) i w tramie (5,0), a zakłócenia przebiegu izochrom występują przy otworze na trzpień.

### 3. Obliczenia numeryczne

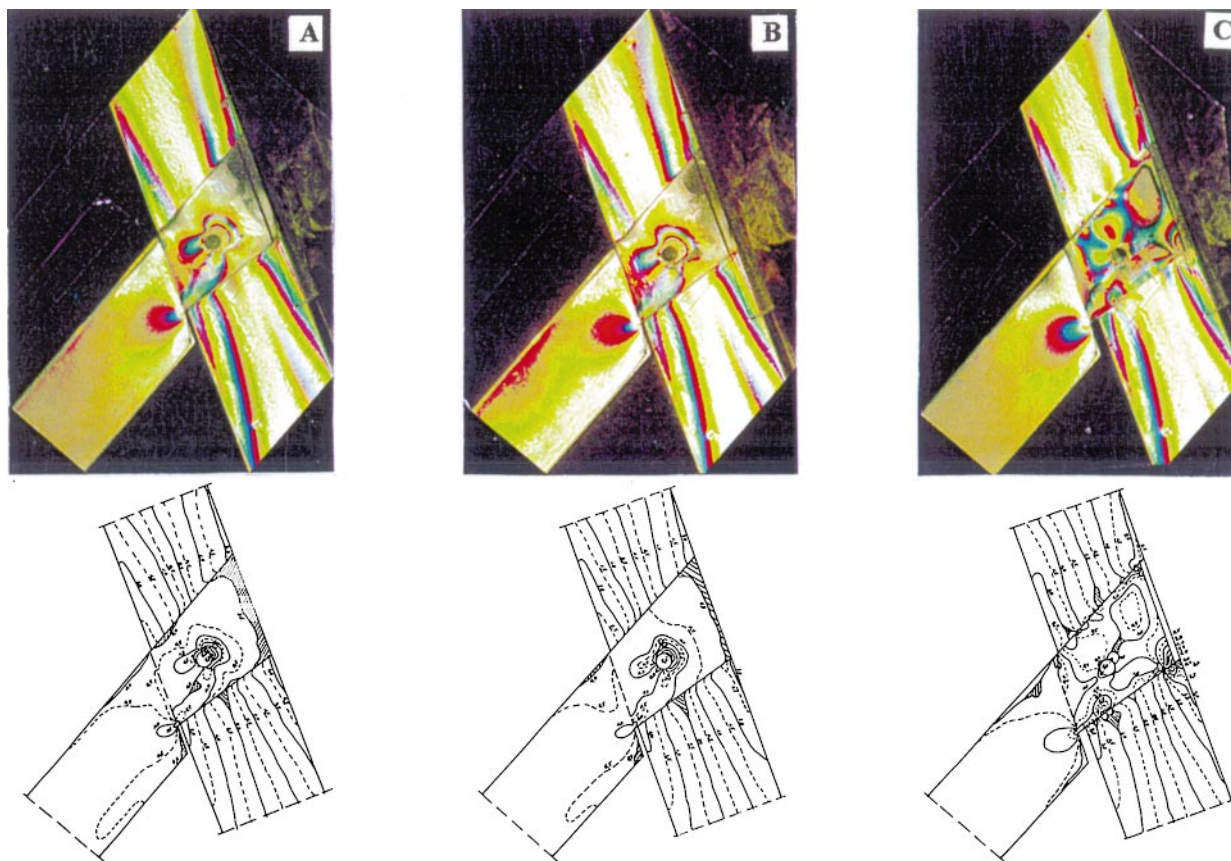
Celem przeprowadzonej analizy numerycznej było ustalenie mapy naprężeń normalnych  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  oraz naprężeń stycznych  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , dla badanych połączeń na czop i gniazdo oraz na jaskółczy ogon. Ponadto celem było porównanie wyników obliczeń z układem izochrom uzyskanych w wyniku badań elastooptycznych. W połączeniu na czop i gniazdo obliczenia zostały przeprowadzone przy ścisaniu dla połączenia na czop i gniazdo bez udziału trzpienia i na trzpieniu drewnianym, a przy rozciąganiu na trzpieniu drewnianym. W połączeniach na jaskółczy ogon badania przeprowadzono dla połączeń czopa z gniazdem bez trzpienia, na trzpieniu drewnianym oraz trzpieniu drewnianym współpracującym z połączeniem czopa z gniazdem.

Uzyskane w wyniku obliczeń naprężenia przedstawiono na rysunkach w formie barwnych plansz (map). Przy każdej planszy znajduje się skala barw odnosząca się tylko do tej planszy, zatem nie można porównywać wielkości naprężeń między poszczególnymi planszami posługując się wyłącznie barwami, bez uwzględnienia różnicy w skalowaniu barw dla poszczególnych plansz.

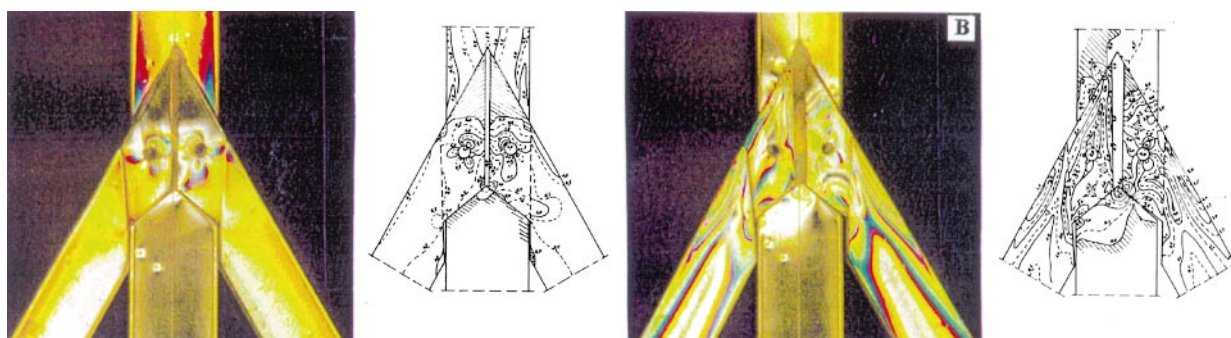
W omówieniu wyników obliczeń poszczególnych połączeń ograniczono się do analizy naprężeń normalnych, równoległych i prostopadłych do badanego elementu.

Omówienie wyników badania poszczególnych połączeń:

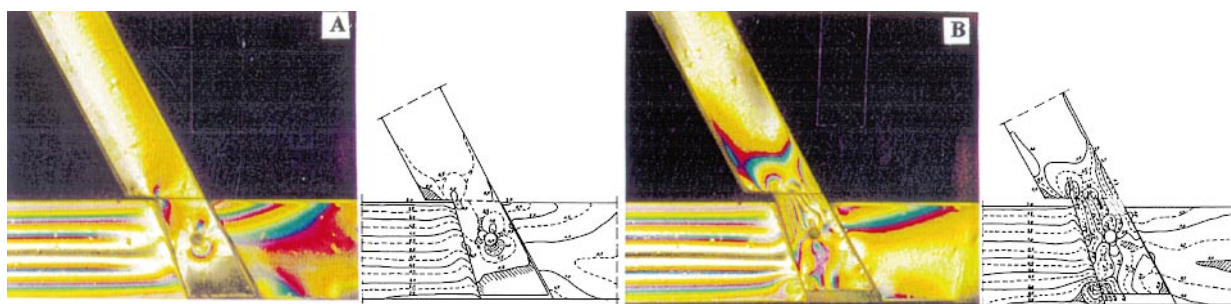
1. Połączenie wieszaka z tramem na gniazdo i czop (rys. 11):
  - przy ścisaniu wieszaka w połączeniu z trzpieniem drewnianym, w czopie naprężenia ściskające i rozciągające, równoległe do osi wieszaka  $\sigma_y$  koncentrują się przy trzpieniu, a naprężenia prostopadłe do osi wieszaka  $\sigma_x$  koncentrują się również przy trzpieniu. Naprężenia bezpośrednio przy trzpieniu uzyskują znacznie większe wartości niż na płaszczyznach docisku elementów, a naprężenia równoległe do osi wieszaka  $\sigma_y$  osiągają znacznie większą wartość niż naprężenia prostopadłe  $\sigma_x$ ,
  - przy ścisaniu wieszaka w połączeniu bez trzpienia obciążenia są przenoszone przez docisk między elementami, wartości naprężeń są tu znacznie mniejsze niż w połączeniu za pomocą trzpienia drewnianego. Występują tu zakłócenia przebiegu naprężeń przy otworze na trzpień,
  - przy rozciąganiu wieszaka w połączeniu z trzpieniem drewnianym, w czopie naprężenia ściskające i rozciągające koncentrują się wokół trzpienia, przy czym naprężenia równoległe  $\sigma_y$  i prostopadłe  $\sigma_x$  do osi wieszaka kształtują się podobnie jak przy ścisaniu – w lustrzanym odbiciu, a ich wartości są zbliżone do wartości przy ścisaniu.
2. Połączenie krokwi z jętką na jaskółczy ogon (rys. 12, 13):
  - przy rozciąganiu jętki (rys. 12) w połączeniu bez trzpienia, gdzie całe obciążenie przenosi czop i gniazdo połączenia, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  i prostopadłe  $\sigma_y$  do osi jętki koncentrują się w narożach i w pobliżu naroży połączenia,
  - przy rozciąganiu jętki w połączeniu z trzpieniem drewnianym naprężenia równoległe  $\sigma_x$  i prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się wokół trzpienia, osiągając maksymalne wartości znacznie niższe niż w połączeniu bez trzpienia,



Rys. 8. Więżba storczykowa – połączenie krokwi z zastrzałem na jaskółczy ogon – rozciąganie:  
 A – połączenie z trzpieniem drewnianym, B – połączenie z trzpieniem stalowym, C – połączenie bez trzpienia



Rys. 9. Więżba storczykowa – połączenie storczyka z mieczem na jaskółczy ogon – rozciąganie:  
 A – połączenie z trzpieniem drewnianym, B – połączenie bez trzpienia



Rys. 10. Więżba storczykowa – połączenie tramu z mieczem na jaskółczy ogon – rozciąganie:  
 A – połączenie z trzpieniem drewnianym, B – połączenie bez trzpienia



- przy rozciąganiu jętki w połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem połączenia, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  występują na prawie całej płaszczyźnie czopu, natomiast prostopadłe  $\sigma_y$  głównie w pobliżu prawej krawędzi czopu, a ich wartość jest mniejsza niż w przypadku przenoszenia obciążeń przez sam trzpień. Układ naprężeń i ich wielkość świadczy o współpracy trzpienia i gniazda w przenoszeniu obciążeń,
  - przy ściskaniu jętki (rys. 13) w połączeniu bez trzpienia, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  koncentrują się w narożu czopu, a prostopadłe  $\sigma_y$  wzdłuż krawędzi początku jaskółczego ogona. Naprężenia te osiągają znaczne wartości, z uwagi na deformacje jętki spowodowane mimośrodem występującym w połączeniu i w konsekwencji wystąpienia lokalnych docisków,
  - przy ściskaniu jętki w połączeniu z trzpieniem drewnianym naprężenia równoległe  $\sigma_x$  koncentrują się między trzpieniem a ukośną krawędzią czopu, osiągając maksymalną wartość w narożu czopu i przy trzpieniu. Naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się wokół trzpienia i w narożu czopu,
  - przy ściskaniu jętki w połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z dociskiem jętki do krokwi, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  i prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się przy trzpieniu, osiągając wyższe wartości niż w połączeniu z samym trzpieniem.
3. Połączenie rozciągane krokwi z zastrzałem na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 14):
- w połączeniu bez trzpienia naprężenia równoległe do osi zastrzału  $\sigma_x$  rozkładają się na całej szerokości czopu, a naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  w górnej części czopu,
  - w połączeniu z trzpieniem drewnianym naprężenia równoległe  $\sigma_x$  i prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się wokół trzpienia, osiągając maksymalne wartości. Między trzpieniem a tylną krawędzią czopu występuje rozciąganie,
  - w połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem połączenia, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  koncentrują się między trzpieniem a bocznymi krawędziami czopu, a naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się między trzpieniem a przednią krawędzią czopu.
4. Połączenie rozciągane storczyka z mieczami na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 15):
- w połączeniu bez trzpienia naprężenia równoległe do osi mieczy  $\sigma_x$  koncentrują się w tylnej partii czopu, wzdłuż jego pionowej krawędzi, a naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się przy wszystkich krawędziach czopu,
  - w połączeniu z trzpieniem drewnianym naprężenia rozciągające równoległe do osi mieczy  $\sigma_x$  rozkładają się równomiernie na prawie całej powierzchni czopu przy wystąpieniu zakłóceń w rejonie trzpienia, naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się przy trzpieniach. Naprężenia prostopadłe o większej wartości niż naprężenia podłużne świadczą o momencie działającym na miecz przy obciążeniu siłą pionową,
  - przy połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem połączenia, naprężenia rozciągające równoległe  $\sigma_x$  rozkładają się równoległe na całej powierzchni czopu, przy zakłóceniach występujących w rejonie trzpienia i dolnej krawędzi czopu. Naprężenia prostopadłe  $\sigma_y$  koncentrują się przy trzpieniach.
5. Połączenie rozciągane tramu z mieczami na jaskółczy ogon w więźbie storczykowej (rys. 16):
- w połączeniu bez trzpienia naprężenia równoległe do osi mieczy  $\sigma_x$  ściskające koncentrują się wzdłuż górnej krawędzi czopu a rozciągające wzdłuż dolnej krawędzi, co jest spowodowane momentem działającym na miecz przy obciążeniu siłą pionową. Naprężenia prostopadłe ściskające i rozciągające  $\sigma_y$  koncentrują się w narożach górnych czopu z powodów jak wyżej. Naprężenia prostopadłe o większej wartości niż podłużne świadczą o działaniu momentu przy obciążeniu miecza siłą pionową,
  - w połączeniu z trzpieniem naprężenia równoległe  $\sigma_x$  i prostopadłe  $\sigma_y$  rozkładają się równomiernie na całej płaszczyźnie czopu, przy czy zakłócenia występują w rejonie trzpienia,
  - w połączeniu z trzpieniem drewnianym współpracującym z czopem i gniazdem połączenia, naprężenia równoległe  $\sigma_x$  koncentrują się wzdłuż podłużnych krawędzi czopu – z prawej rozciąganie, z lewej ściskanie, a naprężenia równoległe  $\sigma_y$ , rozciągające i ściskające koncentrują się w narożach górnych czopu.

## 5. Analiza statyczna badanych połączeń

Z badań przeprowadzonych metodami elastooptrycznymi wynika, że w połączeniach na jaskółczy ogon z udziałem trzpienia większość sił przenoszą trzpień, na co wskazują koncentracje izochrom i maksymalne ich wartości przy trzpieniach. Połączenia na trzpień stalowe nie różnią się zasadniczo układem izochrom i ich wartością w stosunku do połączeń na trzpień drewniane.

Połączenia na jaskółczy ogon bez udziału trzpienia, gdzie całe obciążenie przenosi czop i gniazdo połączenia, charakteryzują się znacznymi przemieszczeniami elementów w kierunku działania sił oraz koncentracjami izochrom wzdłuż krawędzi połączenia i maksymalnymi wartościami izochrom w narożach połączeń.

Maksymalne wartości izochrom w połączeniach bez trzpienia, we wszystkich badanych przypadkach są większe niż w połączeniach z trzpieniami.

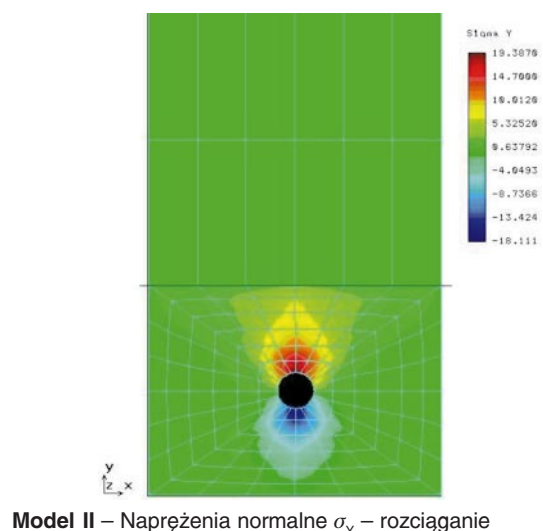
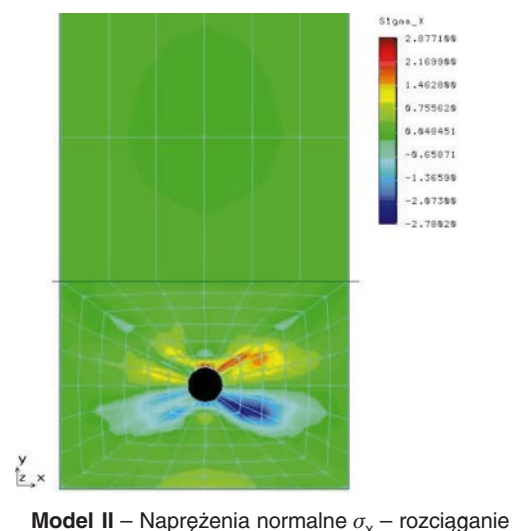
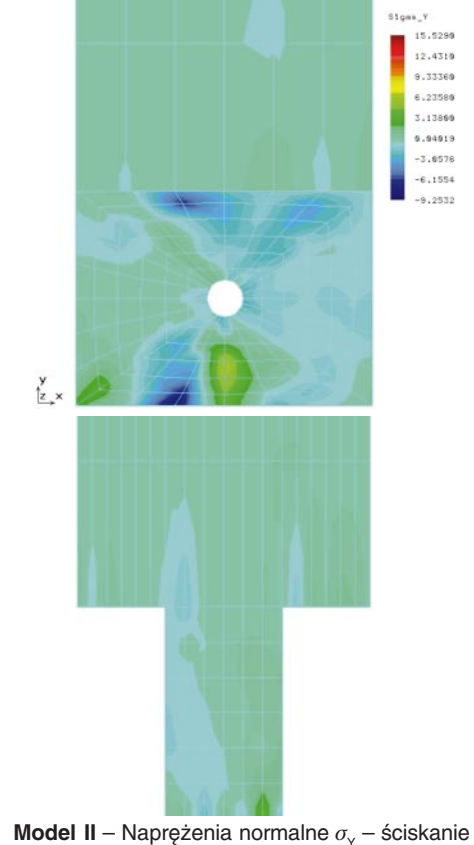
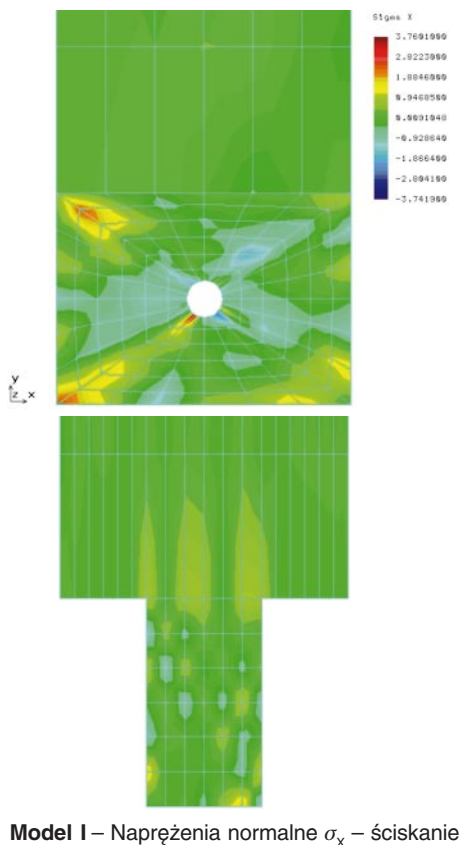
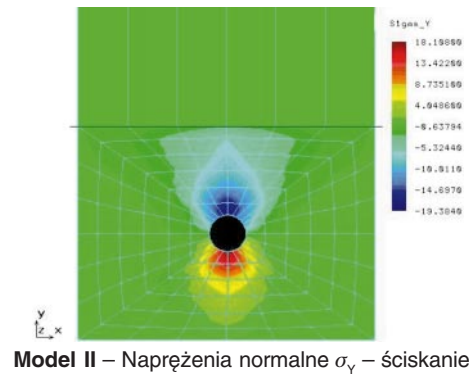
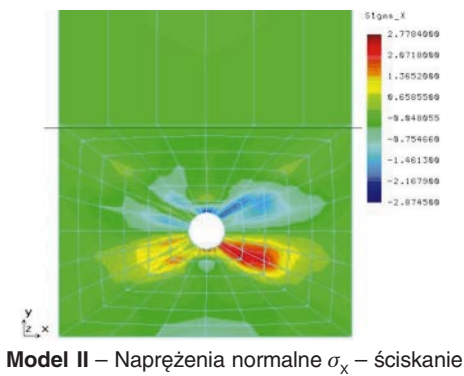
W połączeniu ściskanym na czop i gniazdo z trzpieniem drewnianym gros obciążenia jest przenoszone przez docisk elementów.

Z wykonanych obliczeń i sporządzonych map naprężeń w 3 badanych modelach połączeń wynika, że w każdym z badanych połączeń maksymalne naprężenia równoległe do elementu rozciąganego lub ściskanego  $\sigma_x$ , w innym modelu połączenia mają maksymalne i minimalne wartości. Podobnie kształtują się pozostałe naprężenia normalne i styczne. Zatem nie można ustalić wspólnej zależności, dla wszystkich badanych połączeń, między modelem połączenia, a wielkością naprężeń maksymalnych (tab. 1).

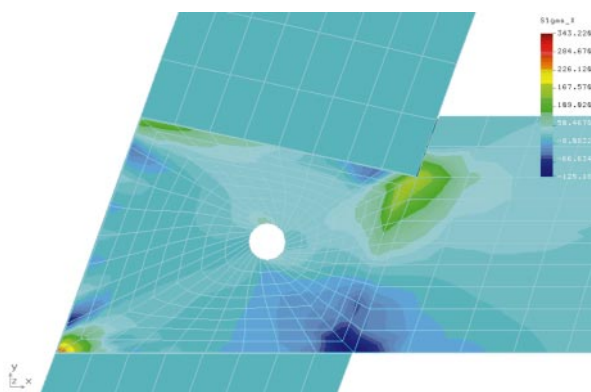
Wyniki uzyskane obu metodami są na ogół zbieżne.

Obraz ewentualnych zniszczeń, wynikający z przeprowadzonych badań, które wystąpią w partiach połączeń o największych naprężeniach, będzie się kształtował następująco:

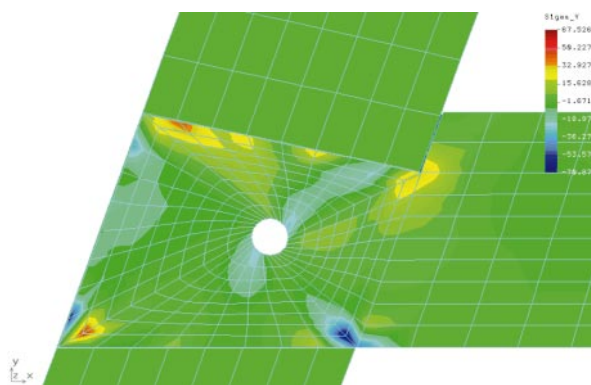
- w połączeniu na czop i gniazdo bez udziału trzpienia będą to zniszczenia w narożach i wzdłuż krawędzi bocznych czopu, polegające na odkształceniu tych krawędzi i w przypadku rozciągania na przemieszczeniu elementu łączonego w kierunku działania siły, a w przypadku ści-



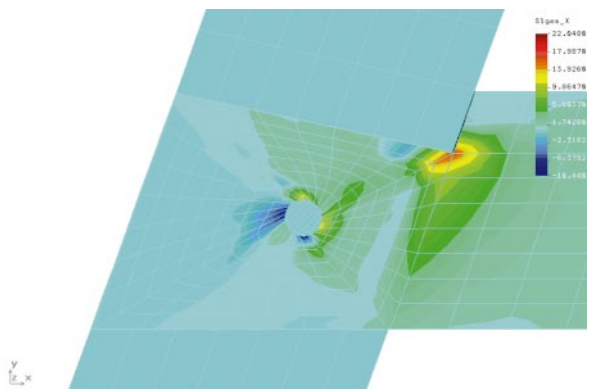
Rys. 11. Połączenie wieszaka z tramem na gniazdo i czop: A – ściskanie – obciążenie przenosi trzpień drewniany, B – ściskanie – obciążenie jest przenoszone przez docisk elementów, C – rozciąganie – obciążenie przenosi trzpień drewniany



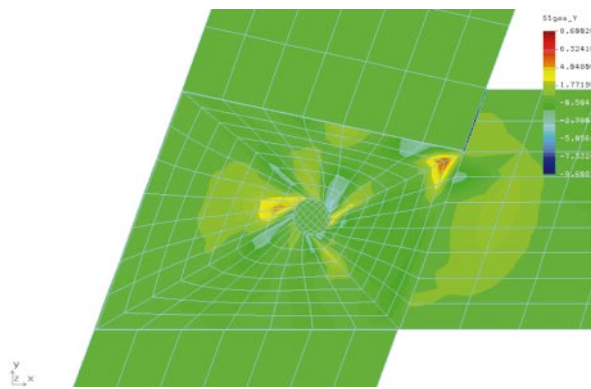
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



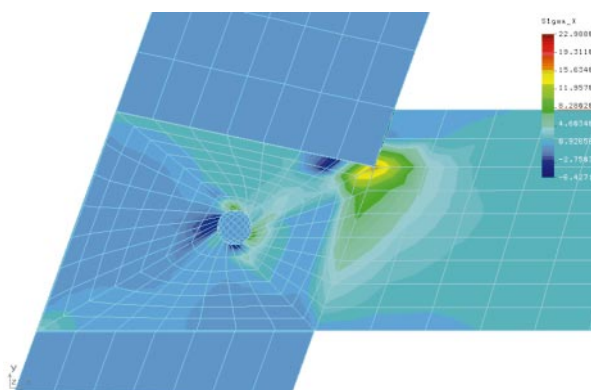
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_y$



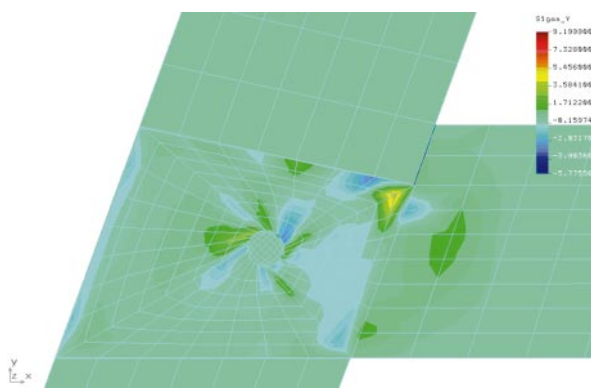
Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_y$



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_y$

Rys. 12. Połączenie krokwi z jętką na jaskółczy ogon – rozciąganie: A – obciążenie przenosi gniazdo połączenia, B – obciążenie przenosi trzpień drewniany, C – obciążenie przenosi trzpień drewniany i gniazdo połączenia

skania na odkształceniu tego elementu wskutek mimośrodowego działania siły,

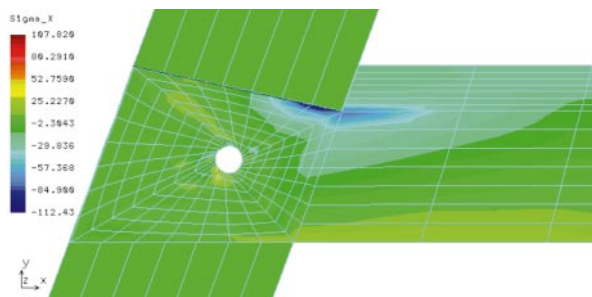
- w połączeniu na trzpień będą to wgnioty w czopie w miejscu łączenia z trzpieniem, a następnie ścięcie partii czopu między otworem czopu a tylną jego krawędzią,
- w połączeniu na trzpień współpracujący z czopem i gniazdem połączenia będą to wgnioty w czopie w miejscu łączenia z trzpieniem oraz zniszczenia w narożach i wzdłuż krawędzi bocznych czopu, połączone z przemieszczeniem elementu łączącego.

Różnice w wynikach uzyskanych obiema metodami mają przyczynę w modelach do badań elastooptycznych wykona-

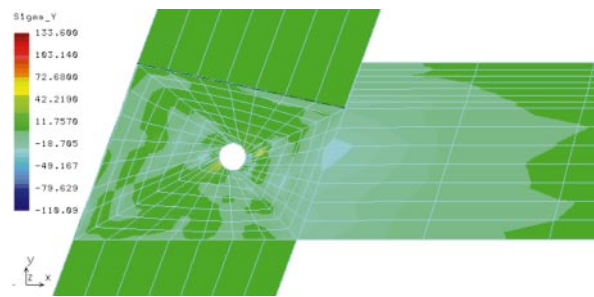
nych z kompozycji żywicznej, która jest materiałem izotropowym, podczas gdy drewno jest materiałem anizotropowym.

Badania przeprowadzono bez uwzględnienia odkształcenia drewna w wyniku skurczu, który ma szczególnie znaczący wpływ na pracę połączenia na jaskółczy ogon. Skurcz elementu rozciąganego powoduje niewielką redukcję kąta jaskółczego ogona, ponieważ jego szersza część ulegnie większemu zmniejszeniu niż część węższa. W kurczącym się elemencie prostopadłym bądź ukośnym (w badanym przypadku to: krokiew, storczyk lub tram) nastąpi znacznie większy przyrost kąta pochylenia płaszczyzny oporowej jaskółczego ogona. Element z jaskółczym ogonem przesunie się, aby utrzymać kontakt z łączonym elementem. W kon-

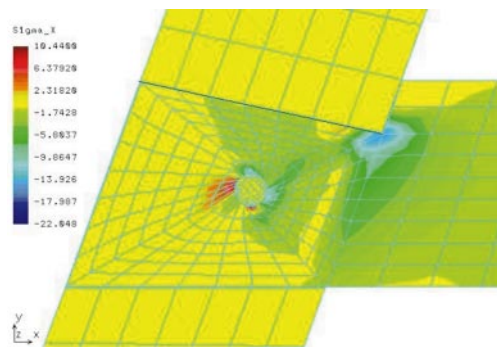




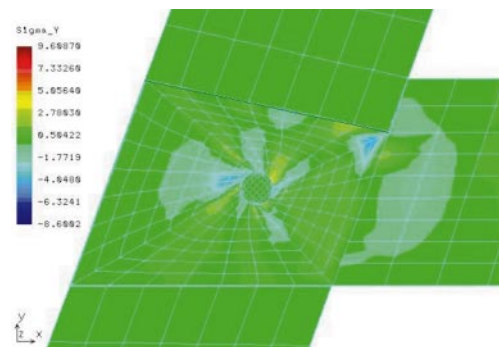
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_x$  – ściskanie jętki



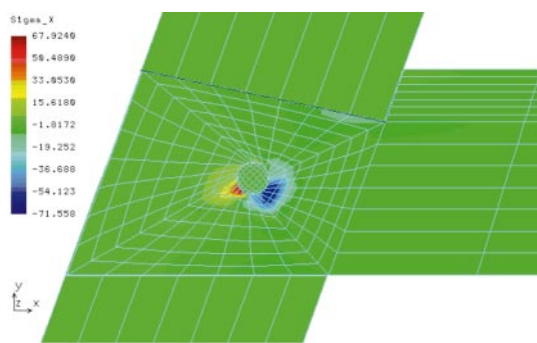
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_y$  – ściskanie jętki



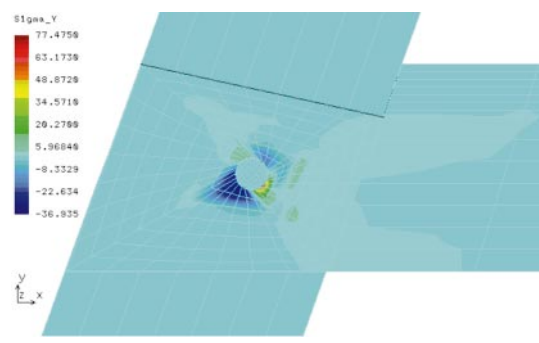
Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_x$  – ściskanie jętki



Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_y$  – ściskanie jętki



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_x$  – ściskanie jętki



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_y$  – ściskanie jętki

Rys. 13. Połączenie krokwi z jętką na jaskółczy ogon – ściskanie: A – obciążenie jest przenoszone przez docisk jętki do krokwi, B – obciążenie przenosi trzpień drewniany, C – obciążenie przenosi trzpień drewniany i docisk jętki do krokwi

sekwencji płaszczyzna kontaktu elementów zostanie znacznie zredukowana [1].

Znaczące przybliżenie wyników badań prowadzonych metodą elastoptyczną do rzeczywistych zachowań drewna w połączeniach można uzyskać wykonując badania na modelach z drewna w skali naturalnej lub w niewielkim pomniejszeniu, pokrytych warstwą optycznie czułą.

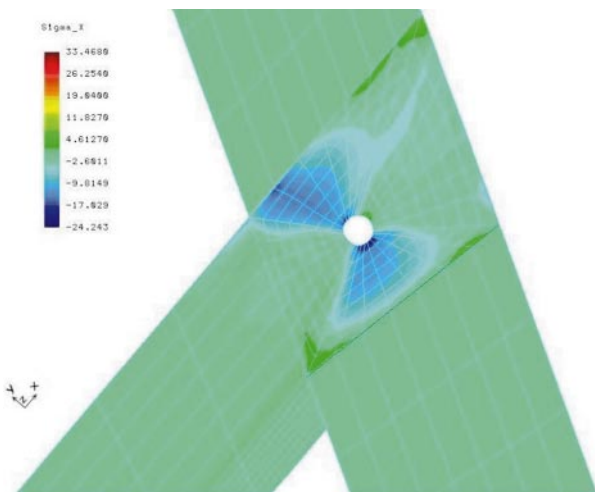
## 6. Podsumowanie

Przedstawiony materiał jest oryginalnym materiałem wynikającym z przeprowadzonych przez autorów badań własnych. Ma służyć lepszemu zrozumieniu pracy statycznej połączeń drewnianych realizowanych w zabytkowych obiektach drewnianych. Będzie również pomocny przy właściwym doborze metod naprawy, konserwacji i wzmocnienia konstrukcji historycznych z zachowaniem autentyczności materii i doktryny konserwatorskiej.

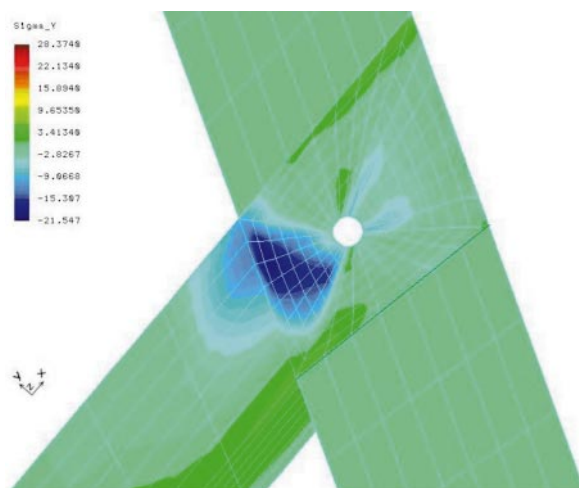
Badania przeprowadzono w Laboratorium Badań Elastooptycznych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem dra inż. L. Jankowskiego.

## 7. Literatura

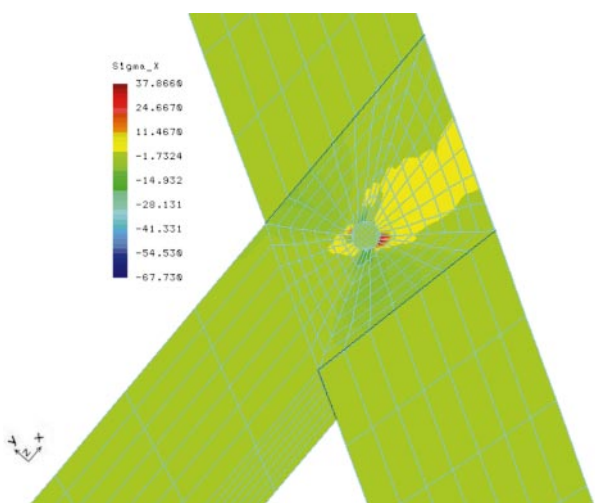
- [1] Yeomans D., *The repair of historic timber structures*. Thomas Telford London 2003.
- [2] Jasieńko J., *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmocnieniu zabytkowych konstrukcji drewnianych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.
- [3] Ross P., *Appraisal and repair of timber structures*. Thomas Telford London 2002.
- [4] Church J.R., Tew B.W., *Characterization of bearing strength factors in pegged timber connections*. Journal of Structural Engineering 1997.



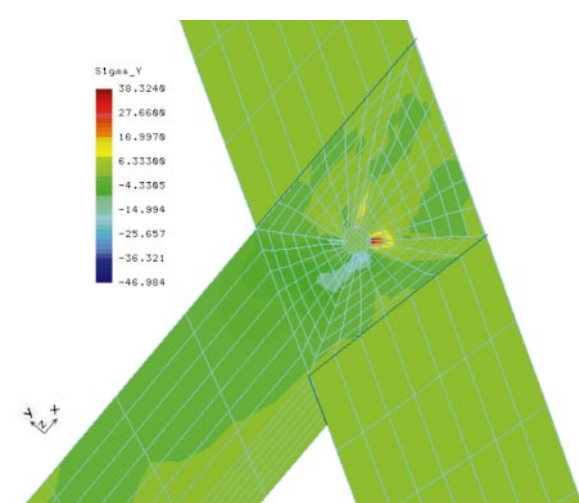
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



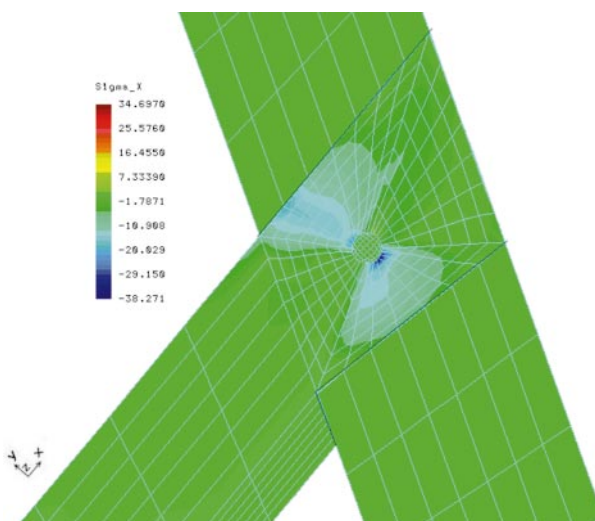
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_y$



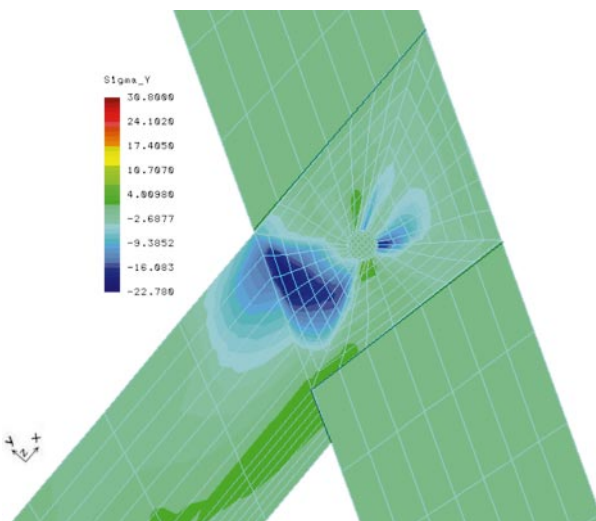
Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_y$

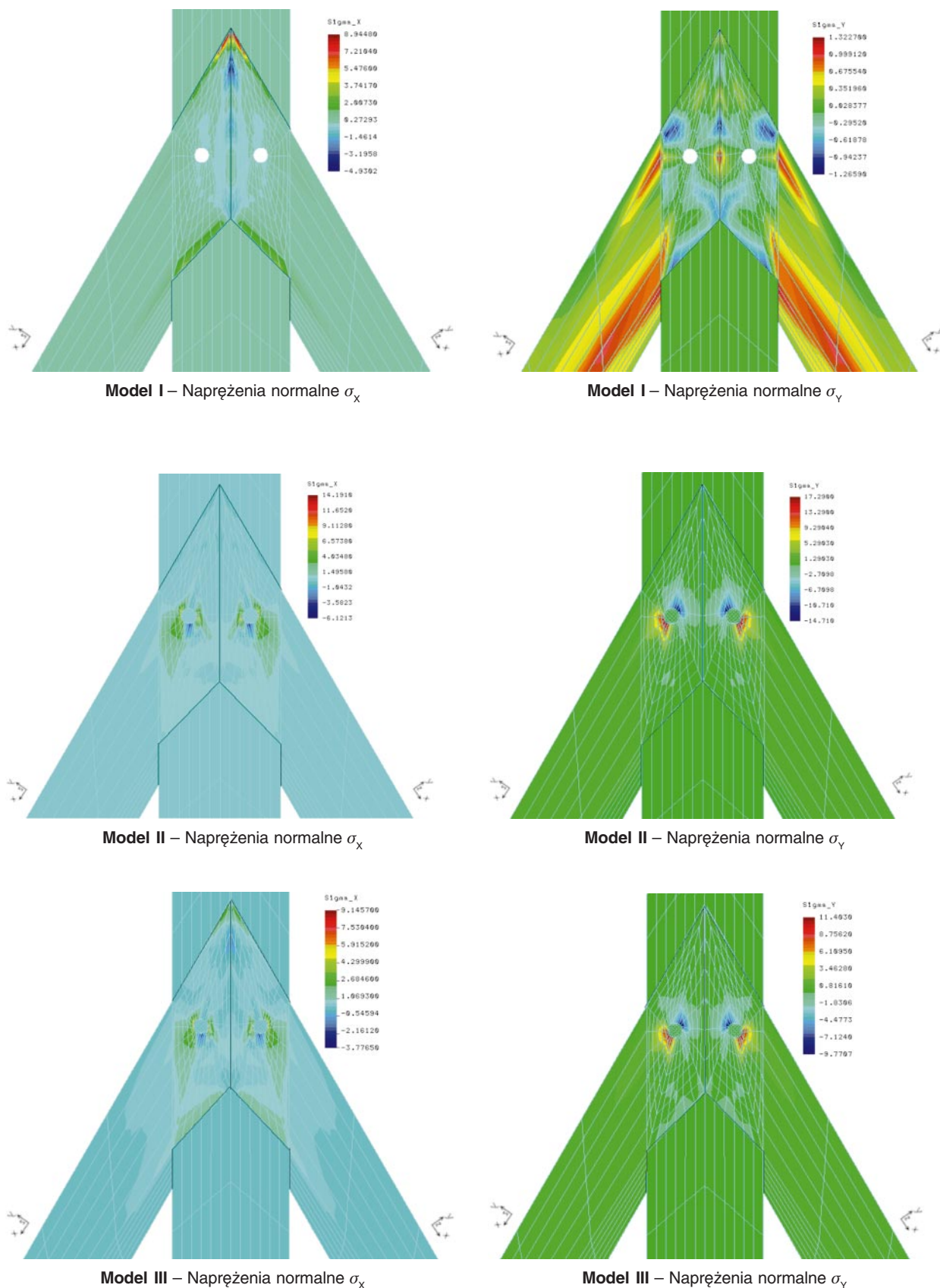


Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



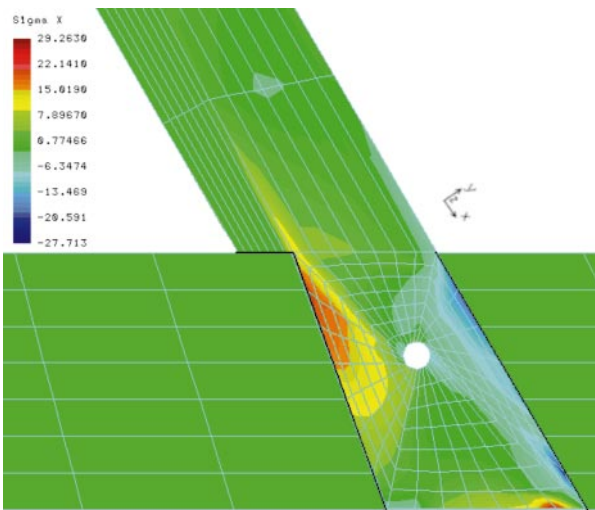
Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_y$

Rys. 14. Wiązba storczykowa – połączenie krokwi z zastrzałem na jaskółczy ogon – rozciąganie: A – obciążenie przenosi gniazdo połączenia, B – obciążenie przenosi trzpień drewniany, C – obciążenie przenosi trzpień drewniany i gniazdo połączenia

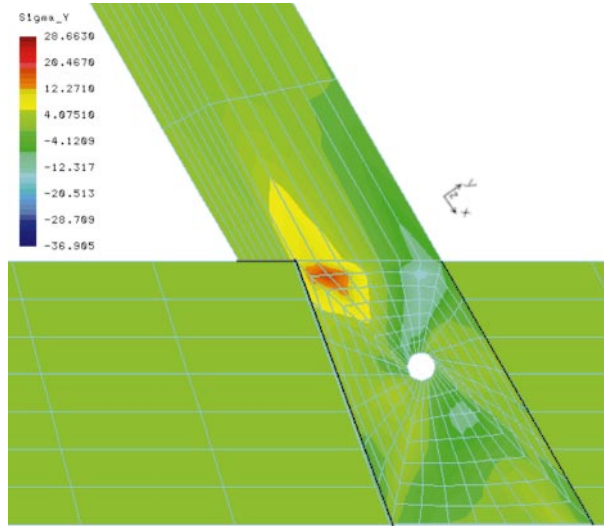


Rys. 15. Wiązba storczykowa – połączenie storczyka z mieczami na jaskółczy ogon – rozciąganie: A – obciążenie przenosi gniazdo połączenia, B – obciążenie przenosi trzpień drewniany, C – obciążenie przenosi trzpień drewniany i gniazdo połączenia

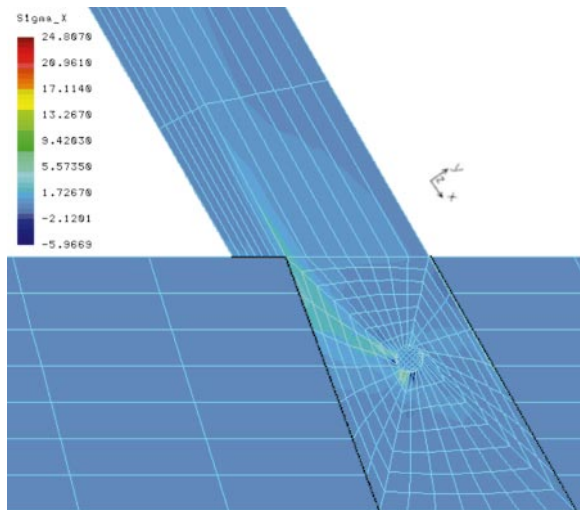




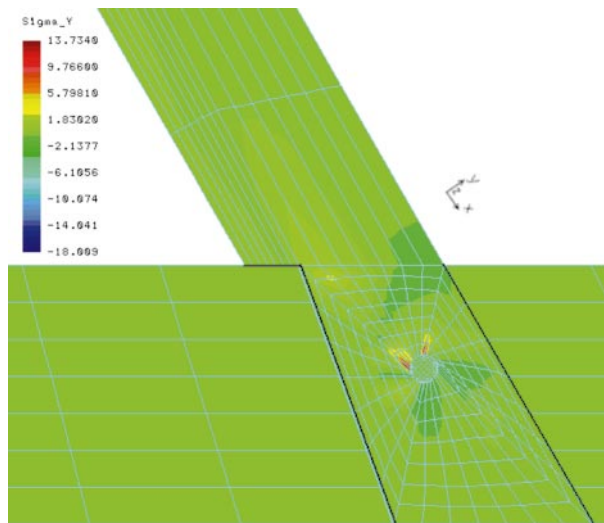
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



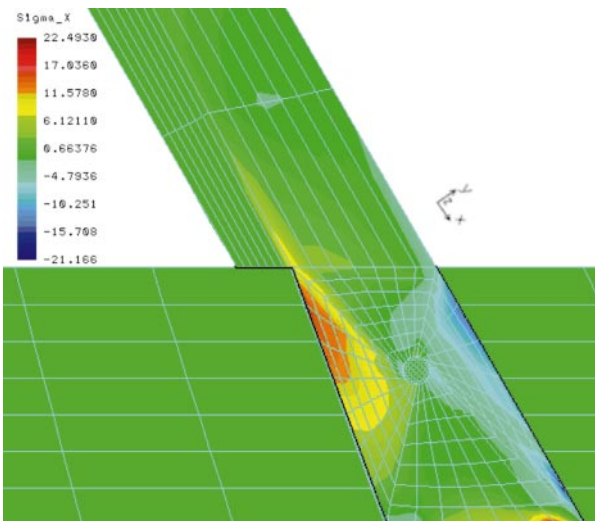
Model I – Naprężenia normalne  $\sigma_y$



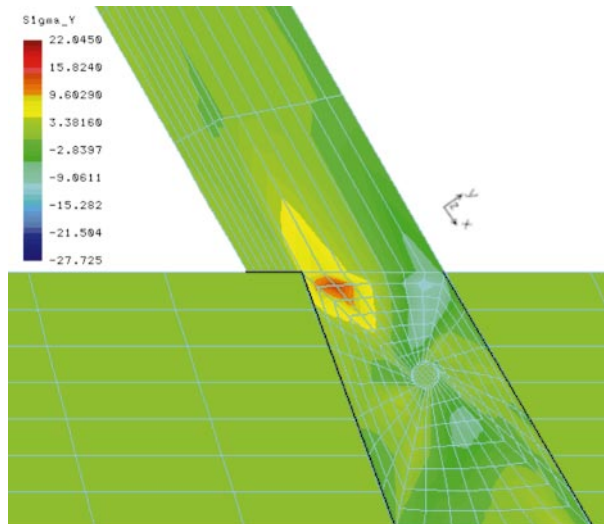
Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



Model II – Naprężenia normalne  $\sigma_y$



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_x$



Model III – Naprężenia normalne  $\sigma_y$

Rys. 16. Więżba storczykowa – połączenie tramu z mieczami na jaskółczy ogon – rozciąganie: A – obciążenie przenosi gniazdo połączenia, B – obciążenie przenosi trzpień drewniany, C – obciążenie przenosi trzpień drewniany i gniazdo połączenia

Tab.1. Zestawienie maksymalnych izochrom i naprężeń normalnych w połączeniach, uzyskanych w wyniku badań metodą elastooptyczną oraz obliczeń wykonanych metodą numeryczną

Połączenie – model obciążenia	Badania elastooptyczne		Obliczenia numeryczne	
	Rząd izochromy	maksymalne naprężenia normalne		
		równoległe do osi elementu	prostokątne do osi elementu	
1. Połączenie wieszaka z trzem: a) ściskanie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	3,5	$\sigma_y = 9,3$	$\sigma_x = 3,7$	
– trzpień drewniany (model II)	4	$\sigma_y = 19,4$	$\sigma_x = 2,9$	
b) rozciąganie:				
– trzpień drewniany (model II)	4,5	$\sigma_y = 18,1$	$\sigma_x = 2,8$	
2. Połączenie krokwi z jętką: a) rozciąganie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	6	$\sigma_x = 12,5$	$\sigma_y = 7,0$	
– trzpień drewniany (model II)	–	$\sigma_x = 10,4$	$\sigma_y = 9,6$	
– trzpień stalowy i gniazdo	5	–	–	
– trzpień drewniany i gniazdo (model III)	5	$\sigma_x = 6,4$	$\sigma_y = 5,8$	
b) ściskanie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	–	$\sigma_x = 112,4$	$\sigma_y = 110,1$	
– trzpień drewniany (model II)	–	$\sigma_x = 22,0$	$\sigma_y = 8,6$	
– trzpień stalowy i gniazdo	–	–	–	
– trzpień drewniany i gniazdo (model III)	–	$\sigma_x = 71,6$	$\sigma_y = 36,9$	
3. Połączenie krokwi z zastrzałem – rozciąganie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	6	$\sigma_x = 24,2$	$\sigma_y = 21,5$	
– trzpień drewniany (model II)	–	$\sigma_x = 67,7$	$\sigma_y = 47,0$	
– trzpień stalowy i gniazdo	5	–	–	
– trzpień drewniany i gniazdo (model III)	5	$\sigma_x = 38,3$	$\sigma_y = 22,8$	
4. Połączenie storczyka z mieczem – rozciąganie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	3,0-6,0	$\sigma_x = 4,9$	$\sigma_y = 1,3$	
– trzpień drewniany (model II)	–	$\sigma_x = 6,1$	$\sigma_y = 14,7$	
– trzpień drewniany i gniazdo (model III)	3,0-4,0	$\sigma_x = 3,8$	$\sigma_y = 9,8$	
5. Połączenie tramu z mieczem – rozciąganie:				
– gniazdo – bez trzpienia (model I)	5	$\sigma_x = 27,7$	$\sigma_y = 36,9$	
– trzpień drewniany (model II)	–	$\sigma_x = 6,0$	$\sigma_y = 18,0$	
– trzpień drewniany i gniazdo (model III)	4	$\sigma_x = 21,2$	$\sigma_y = 27,7$	

- [5] Ceccotti A., *Evaluation and analysis of the timber structures*. Structural Analysis of Historical Constructions, Modena 2005.
- [6] Sandberg L.B., Bulleit W.M., Reid E.H., *Strength and stiffness of oak pegs in traditional timber-frame joints*. Journal of Structural Engineering, 2000.
- [7] Ganowicz R., (Rapp. P.), *Historyczne więzby dachowe polskich kościołów – Historyczny rozwój ciesielskich konstrukcji dachowych w polskich kościołach*. WAR, Poznań 2000.
- [8] Glapiak M., Łodygowski T., *Wpływ długotrwałego obciążenia cyklicznego na deformacje wielotrzpieniowego połączenia w konstrukcji drewnianej*. Konferencja Naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 2004.
- [9] Gołębiowski Z., *Podstawy obliczeniowe złączy trzpieniowych według założeń odkształceń sprężysto-plastycznych*. Archiwum Inżynierii Lądowej, Nr 2, 1997.
- [10] Jeruzal J., *Badanie sztywności drewna w złączy trzpieniowym*. Konferencja Naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 2002.
- [11] Kubiak J., *Porównanie wybranych metod badań sztywności drewna w złączy trzpieniowym*. Konferencja Naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin – Świnoujście 1999.
- [12] Łodygowski T., Kąkol W., Glapiak M., *Numeryczna ocena zmiany podatności węzła konstrukcji drewnianej na skutek obciążeń cyklicznych*. Konferencja Naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 2002.
- [13] Malinowski C., *Własności drewna w gnieździe łącznika trzpieniowego i metody ich badania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 476, 1986.