

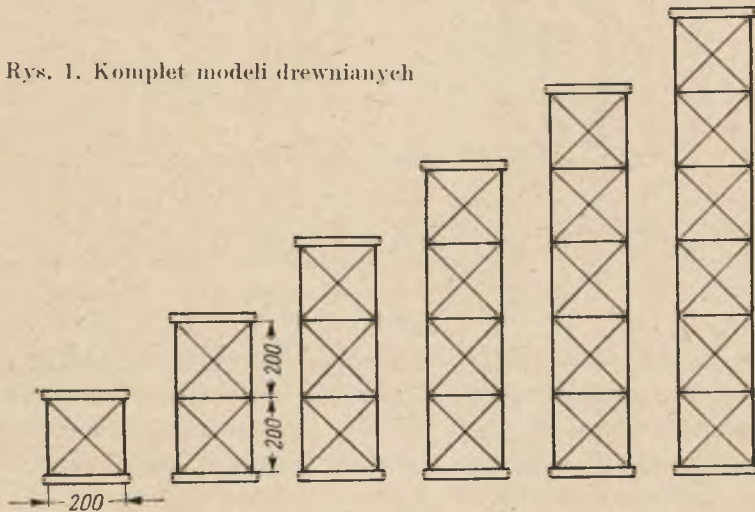
*Józef Ledwoń*

## Badania modeli trzonów przewodniczych wież wyciągowych

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów tensometrycznych modeli trzonów przewodniczych stalowych wież wyciągowych dla spotykanych w praktyce schematów obciążeń.

### 1. Opis modeli i sposobu pomiarów

W celu ustalenia wpływu braku usztywnień poziomych (przepon) na stateczność trzonu przewodniczego oraz przeciążenia jednostronnego zostały dokonane badania modeli trzonów.

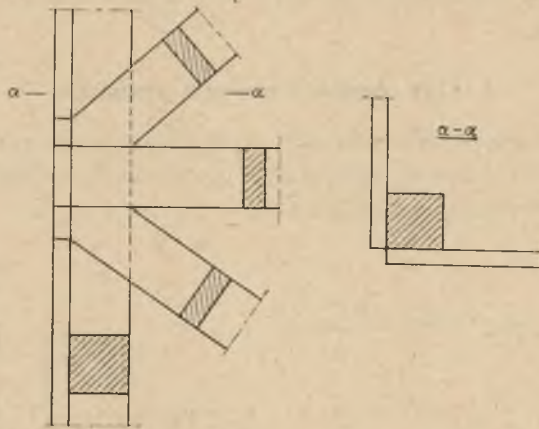


Wykonano najpierw badania na modelach drewnianych, następnie zaś na modelach metalowych (stalowych).

Na rysunku 1 przedstawiono jeden komplet modeli drewnianych. Wymiary modeli dostosowano do wielkości swobodnej przestrzeni między kolumnami maszyny wytrzymałościowej. W rzucie poziomym model nie mógł mieć większych rozmiarów niż  $230 \times 230$  mm, jego wysokość zaś nie mogła przekroczyć 1400 mm.

Sam pomiar wielkości sił ściskających uzyskanych w maszynie wytrzymałościowej typu Amslera, 50 — tonowej — mógł odbywać się z dokładnością do jednego kilograma przy ściskaniu modeli drewnianych, natomiast z dokładnością do 10 kg przy ściskaniu modeli stalowych. Obciążenie stopniowano jednak co 50 kg dla modeli drewnianych, a co 500, 1000 a nawet co 2000 kg dla modeli stalowych doprowadzając każdy model aż do zniszczenia.

Modele drewniane wykonano z drewna sosnowego, specjalnie dobraneo, o równym słoju, bez najmniejszych sęków i miejscowych osłabień. Połączenia węzłów wykonano klejone za pomocą kleju kazeinowego.



Rys. 2. Sposób połączenia pasa narożnego z krzyżulecami i rozpórkami

Prócz tego każdy węzeł został wzmocniony cienkimi gwóźdkami stalowymi, którymi przybito pręty krzyżulców i rozpórek do pasów.

Część górna i dolna każdego modelu drewnianego była zakończona płaską tarczą z dykty o grubości 20 mm, w której zostały zamocowane na sztywno końce pasów narożnych przez wklejenie ich w otwory o 1 cm głębokości.

Wymiary poprzeczne pasów narożnych przyjęto dla wszystkich modeli drewnianych równe  $10 \times 10$  mm, krzyżulce i rozpórki  $4 \times 12$  mm.

Dla utrzymania krzyżulców w jednej płaszczyźnie, miejsca ich styku zostały odpowiednio podcięte i połączone za pomocą kleju.

Rysunek 2 obrazuje w większej skali sposób połączenia pasa narożnego z krzyżulecami i rozpórkami.

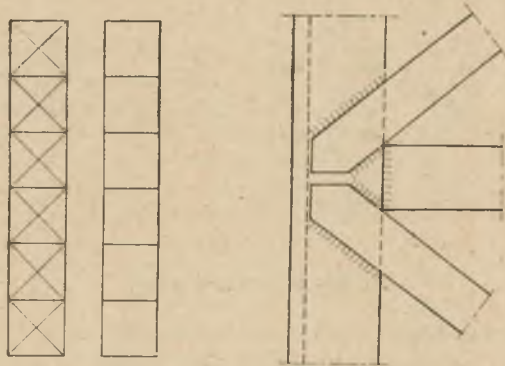
Modele stalowe wykonano z kątowników walcowanych  $25 \times 25 \times 3$  mm i płaskowników  $20 \times 3$  mm oraz prętów okrągłych  $\varnothing 10$  mm.

Użyto stali konstrukcyjnej zwykłej jakości.

Rysunek 3 przedstawia dwa rodzaje modeli stalowych, jakie były użyte do dalszych badań.

Blachy poziome na końcach modeli przyjęto o grubości 5 mm, do których przymocowano spoinami punktowymi pasy narożne o wyrównanej powierzchni styku i możliwie dokładnie jednakowej długości. Wszystkie połączenia węzłów wykonano jako spawane.

Odkształcenia poszczególnych prętów modeli mierzono za pomocą tensometrów typu Huggenbergera z nastawną wskazówką na najmniej-



Rys. 3. Rodzaje modeli stalowych

szej bazie pomiarowej wynoszącej 20 mm. Podziałki tych tensometrów są zaopatrzone w zwierciadła, aby przy odczytach można było uniknąć błędów przypadkowych wywołanych nieprostym ustawieniem się obserwatora do podziałki.

Zamocowania tensometrów do modelu dokonano za pomocą specjalnych lekkich uchwytów pozwalających na łatwe ich utwierdzenie w dowolnym położeniu.

Wszystkie modele drewniane oraz część modeli stalowych badano na ściskanie osiowe. W tym celu wmontowano do maszyny wytrzymałościowej przeguby kuliste, aby uniknąć wpływu mimośrodkowego ściskania. Późniejsze obserwacje przyrostów odkształceń pasów pod zadanymi obciążeniami wskazywały na to, że działanie przegubów jest skuteczne i obciążenie przekazuje się prawie zupełnie równomiernie na każdy z czterech pasów narożnych.

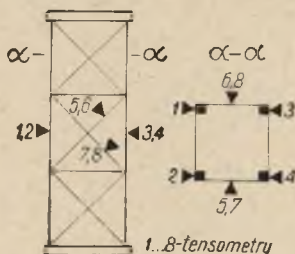
Modele stalowe o skratowaniu krzyżowym zostały poddane także ściskaniu w ten sam sposób, że siłę przyłożono tylko do dwóch słupków.

dla zbadania stopnia współpracy sąsiedniej pary słupków w przenoszeniu obciążenia.

Do powyższego schematu obciążenia założono w maszynie wytrzymałościowej przegubowe podparcie z jednej strony, z drugiej zaś podpórę płaską.

## 2. Wyniki pomiarów modeli drewnianych

Pomiary odkształceń poszczególnych prętów rozpoczęto na modelach o średniej wielkości (rys. 4).



Rys. 4. Rozmieszczenie tensometrów na modelu o trzech polach

### 2.1. Model o trzech polach

Odczyty na podziałkach tensometrów zostały zestawione w tablicy 1.

Siła ściskająca początkowa oznaczona jako 0 wynosiła faktycznie 2–3 kg, aby nie powodować poruszenia się przy lekkim opukiwaniu modelu dla usunięcia pewnej bezwładności wskazówek tensometrów.

Lekkie opukiwanie modelu było stosowane także przy dalszych odczytach.

W chwili gdy siła ściskająca wynosiła około 900 kg, zauważono początek wychylania się krzyżuleców górnego i dolnego pola z płaszczyzn ścian bocznych modelu. Krzyżulec pola środkowego pozostały proste nawet po złamaniu pasów narożnych. Wobec umieszczenia tensometrów na krzyżulcach pola środkowego wyniki pomiaru odkształceń krzyżuleców nie są uzależnione od ich wychylenia z płaszczyzny ściany bocznej, które w ogóle tu nie nastąpiło.

Odczytywanie podziałek na tensometrach zostało zakończone przy sile ściskającej przekraczającej nieco 1300 kg, kiedy usłyszano wyraźny trzask i wskazówki wszystkich tensometrów zajęły różnorodne położenia nie mając nawiązania do poprzednich odczytów. Po zdjęciu tensometrów ściskano model w dalszym ciągu, doprowadzając go do zniszczenia siłą 2000 kg. Zanim osiągnięto powyższą siłę ściskającą, zaobserwowano jeszcze kilka trzasków, po których za każdym razem wielkość siły ściskającej nieco malała, by następnie podwyższyć się o dalsze kilkadziesiąt kilogramów.

Zniszczenie modelu nastąpiło nagle. Został złamany jeden pas w przęśle górnym i dolnym przy równoczesnym znacznym wychyleniu pękniętych na składaniu krzyżuleców tych pól z płaszczyzny ścian bocznych.

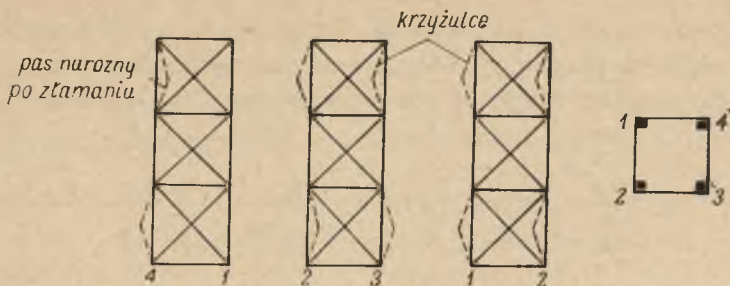
Tablica 1

Siła ścisniająca w kg	T e n s o m e t r y								Uwagi
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Odczyty na tensometrach								
0	20,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0	30,0	30,0	
50	18,5	18,9	18,5	18,8	29,5	30,1	29,6	30,8	
100	17,8	17,9	17,0	17,4	29,2	29,9	29,5	31,5	
150	16,0	16,9	16,0	16,1	29,1	29,8	29,3	32,0	
200	15,0	15,8	15,1	15,0	29,0	29,4	29,2	31,1	
250	13,9	14,4	14,3	14,0	29,0	29,1	29,2	31,1	
300	12,4	12,8	13,1	13,5	28,8	29,0	29,0	30,9	
350	10,9	11,8	11,8	11,2	28,0	29,0	28,8	29,8	
400	9,5	10,0	11,0	11,0	27,6	28,4	28,5	29,3	
450	8,5	8,8	10,0	10,1	27,2	28,0	28,2	29,0	
500	6,9	7,5	8,9	7,6	26,8	27,2	27,8	28,8	
550	5,5	6,0	7,3	6,3	26,5	26,9	27,7	28,6	
600	4,5	5,0	6,1	5,0	26,1	26,7	27,4	28,3	
650	3,6	4,0	4,5	4,0	25,6	26,2	26,8	27,6	
650	40,0	40,0	40,0	40,0	25,6	26,2	26,8	27,6	Nowe nastawienie wskazówek tensometrów 1, 2, 3 i 4
700	38,0	38,0	38,5	38,5	25,0	26,0	24,5	26,6	
750	36,2	36,2	36,6	37,8	24,5	25,6	24,0	26,0	
800	35,0	35,1	35,4	36,5	23,8	25,2	23,1	25,0	
850	34,0	33,9	34,0	35,2	22,1	23,6	22,0	24,1	
900	32,2	32,9	32,9	33,1	21,3	22,7	20,6	23,2	
950	31,0	31,5	31,8	32,0	20,0	21,4	19,2	22,0	
1000	29,1	30,3	30,6	30,8	17,5	20,3	16,1	20,6	
1050	28,5	29,0	29,2	29,8	16,0	19,2	14,4	19,7	
1100	27,1	28,0	28,6	29,2	14,2	17,6	12,1	18,4	
1150	25,2	26,3	27,0	27,8	12,3	14,4	10,3	16,3	
1200	24,3	25,2	25,8	26,6	9,8	12,0	8,1	14,4	
1250	23,1	24,2	24,6	25,0	6,7	10,3	6,2	10,9	
1300	21,5	22,8	23,0	24,0	4,6	8,5	4,5	7,6	

Na rysunku 5 przedstawiono w widokach bocznych kształt modelu po zniszczeniu.

Z analizy odczytów podziałek tensometrów zestawionych w tablicy 1 jest widoczne, że pionowe pasy narożne przejmują przy ścisnaniu prawie dokładnie jednakowe siły.

Wielkość skróceń poszczególnych pasów narożnych mierzona ilością podziałek tensometrycznych wynosi:



Rys. 5. Kształt modelu po zniszczeniu

pas 1	$(20,0 - 3,6) + (40,0 - 21,5) = 34,9$
„ 2	$(20,0 - 4,0) + (40,0 - 22,8) = 33,2$
„ 3	$(20,0 - 4,0) + (40,0 - 23,0) = 32,5$
„ 4	$(20,0 - 4,0) + (40,0 - 24,0) = 32,0$

wartość średnia = 33.

Wielkość skróceń krzyżulcowych wynosi:

krzyżulec 5	$30,0 - 4,6 = 25,4$
„ 6	$30,0 - 8,5 = 21,5$
„ 7	$30,0 - 4,5 = 24,5$
„ 8	$30,0 - 7,6 = 22,4$

wartość średnia = 23,7.

Stosunek obu wielkości  $\frac{23,7}{33,1} = 0,715$  przekroczył nieco teoretycznie

możliwe  $\frac{1}{2} = 0,707$ . Wynika z tego, że przy tych wartościach siły ściskającej wystąpiło już pewne zginanie krzyżulców, chociaż nie zostało ono wyraźnie dostrzeżone.

Obliczając w podobny sposób stosunki wydłużeń krzyżulców i pasów dla różnych wartości siły ściskającej przekonamy się, że krzyżulce są coraz to bardziej przeciążane. Początkowo przy małych siłach ściskających udział skratowania bocznego w przenoszeniu obciążenia jest więc nieznaczny. Dopiero dla sił bliskich siłom niszczącym krzyżulce przenoszą obciążenia, jakie można by obliczyć wychodząc z odkształceń teoretycznych pasów i związanych z nimi krzyżulców.

## 2.2. Model o dwóch polach

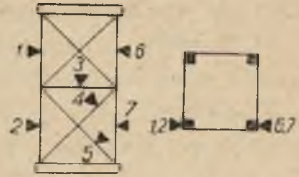
W tym przypadku chodzi nam o potwierdzenie wyników uzyskanych z pomiarów modelu A oraz o zbadanie, jak zachowują się rozpórki poziome. Tensometry zostały zamocowane na jednej ścianie bocznej modelu według rysunku 6.

W tabelicy 2 zestawiono odczyty na podziałkach tensometrów przy tym samym przyroście sił ściskających co poprzednio.

Także i z tej tablicy jest widoczne, że praca krzyżulców wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia nieliniowo. Prócz tego można zaobserwować zachowanie się rozpórek poziomych. Są one nieznacznie rozciągane, zmniejszając tym samym siły podłużne w krzyżulcach.

Wydłużanie się rozpórek ma zapewne wpływ na zaobserwowane łamanie się pasów narożnych w polach skrajnych.

Zniszczenie modelu nastąpiło przy sile 1900 kg, przy czym złamane zostały dwa pasy narożne po uprzednim wychyleniu się krzyżulców z płaszczyzn ścian bocznych modelu.



Rys. 6. Model o dwóch polach

Z wielkości siły krytycznej wynika, że pasy narożne są w znacznym stopniu utwierdzone w węzłach.

Tablica 2

Siła ścisakająca w kg	T e n s o m e t r y							Uwagi
	1	2	3	4	5	6	7	
	Odczyty na tensometrach							
0	40,0	40,0	30,0	30,0	30,0	40,0	40,0	
50	38,8	38,3	30,0	31,3	31,5	39,2	39,0	
100	38,5	37,0	30,1	31,1	32,2	38,2	38,1	
150	37,2	36,0	30,2	31,0	32,1	38,1	37,3	
200	36,5	35,0	30,4	31,0	31,1	37,3	36,8	
250	35,7	34,0	30,7	30,8	32,0	36,5	35,9	
300	34,2	33,0	30,7	30,4	31,9	35,8	34,5	
350	33,4	32,0	30,9	30,2	31,1	34,6	33,7	
400	31,8	30,1	30,9	29,7	30,9	33,1	32,0	
450	30,2	29,0	31,0	29,5	30,1	31,8	30,9	
500	29,0	27,9	31,3	29,0	29,8	30,2	29,8	
550	27,1	26,1	31,5	29,1	29,0	29,0	28,1	
600	25,8	25,0	31,0	28,7	28,0	27,3	26,3	
650	24,0	23,0	31,2	28,2	27,1	25,7	24,5	
700	22,4	21,0	31,8	27,1	26,0	24,4	22,8	
750	20,6	19,4	32,2	26,3	24,4	23,2	20,9	
800	19,0	17,8	32,5	24,4	23,7	21,6	20,1	
850	17,2	16,0	33,0	23,1	22,1	19,9	18,3	
900	15,8	14,8	33,1	21,8	21,5	17,8	16,2	
950	14,2	13,0	33,6	20,4	20,0	15,9	15,1	
1000	12,0	11,4	34,0	18,2	17,4	13,7	12,9	
1050	10,1	10,0	34,0	15,9	16,2	11,6	10,8	
1100	8,6	8,2	34,1	13,6	14,1	10,6	9,7	
1150	6,9	7,0	35,0	10,9	12,0	9,2	8,8	
1200	4,2	5,0	36,0	7,4	9,8	8,4	7,1	Zmiana nastawienia tensometrów 1, 2, 6 i 7
1250	2,4	2,0	31,1	3,9	5,9	6,5	4,7	
1250	40,0	40,0	36,1	3,9	5,9	40,0	40,0	
1300	38,0	37,1	35,8	1,7	5,1	38,1	38,5	
1350	36,1	34,0	33,5	2,4	7,2	37,3	36,6	

## 2.3. Model o czterech polach

Na tym modelu chcemy stwierdzić oprócz wielkości siły krytycznej również zachowanie się poszczególnych poprzeczek poziomych oraz równomierność obciążenia pasów narożnych wzdłuż wysokości.

W tabelicy 3 zestawiono odczyty dokonane na podziałkach tensometrów umocowanych zgodnie z rysunkiem 7 na jednej ścianie modelu.

Widoczne jest, że środkowe rozpórki zachowują się mniej więcej jednakowo, doznając wydłużeń o prawie identycznej wielkości.

Tabela 3

Siła ścisająca w kg	T e n s o m e t r y											Uwagi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Odczyty na tensometrach											
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	20,0	20,0	20,0	
50	39,4	39,0	39,0	39,0	39,2	39,4	39,1	39,0	19,9	19,7	20,0	
100	39,1	38,1	38,1	38,3	38,1	38,2	38,2	38,0	19,9	19,6	20,0	
150	38,3	37,8	37,5	38,0	37,8	37,6	37,7	37,1	20,0	19,4	20,2	
200	37,3	36,9	36,8	37,2	36,9	36,6	36,7	36,3	20,1	19,4	20,2	
250	36,9	36,4	35,7	36,7	36,1	35,9	35,9	35,6	20,3	19,7	20,5	
300	36,0	35,2	34,7	35,9	35,2	35,0	35,3	34,7	20,4	20,1	20,7	
350	34,5	33,9	33,2	35,0	34,2	33,8	33,9	33,9	20,7	20,8	20,5	
400	33,2	32,3	32,0	33,5	32,0	32,0	33,0	32,0	20,4	21,5	20,7	
450	32,1	31,0	30,9	32,0	30,6	30,5	32,0	30,9	21,8	21,8	20,9	
500	30,5	29,5	29,5	30,8	29,8	29,3	29,9	29,4	21,9	22,0	21,3	
550	28,8	26,4	26,6	28,4	28,6	28,0	27,7	27,6	22,0	22,3	21,8	
600	26,2	24,1	24,5	26,3	26,3	25,4	25,1	25,7	22,3	22,5	22,0	
650	23,8	23,0	23,0	24,0	24,0	23,5	23,4	24,1	22,5	22,8	23,0	
700	20,9	20,9	20,8	20,9	21,2	21,0	20,9	21,3	22,5	23,4	23,3	
750	18,1	19,0	18,0	18,5	18,5	18,3	17,7	18,9	22,9	23,6	23,4	
800	16,5	17,4	16,0	17,0	17,0	16,5	15,2	17,6	23,2	23,9	23,7	
850	14,0	16,1	14,6	15,1	15,0	14,7	13,1	16,2	23,5	24,1	23,8	
900	12,9	14,8	13,0	13,7	13,1	12,3	11,4	14,3	23,9	24,5	22,5	
950	10,8	12,2	11,8	12,0	10,9	11,2	9,5	12,8	24,0	24,8	23,0	
1000	8,9	10,9	10,5	11,0	7,8	8,8	8,5	10,5	24,4	25,6	23,6	
1050	6,0	8,1	7,8	8,3	5,2	6,7	6,2	8,9	24,7	25,8	24,1	
1050	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	24,7	25,8	24,1	
1100	38,2	38,8	38,7	38,5	38,6	38,2	38,0	37,9	25,0	26,5	24,4	
1150	36,0	37,4	37,0	36,2	37,1	37,0	36,2	36,0	25,2	26,9	25,1	
1200	34,2	35,0	35,1	34,5	35,2	36,0	35,0	34,2	25,5	27,4	25,6	
1250	31,5	34,0	34,2	31,7	32,3	33,5	33,0	30,3	25,9	27,9	26,2	
1300	27,0	32,9	33,0	26,8	25,8	30,2	31,0	27,1	26,5	28,5	26,8	
1350	22,1	30,0	30,8	21,6	20,4	28,3	29,3	24,5	27,1	29,3	27,5	
1400	19,0	27,2	26,6	18,7	15,2	26,1	27,5	21,2	26,5	30,1	28,4	
1450	15,2	25,0	24,5	14,6	11,0	23,0	26,0	18,6	27,0	31,8	29,0	

Zmiana  
nastawień  
tensometrów



Stwarza to dla skrajnych prętów pasów pionowych gorsze warunki pracy niż dla prętów środkowych. Przepony nie doznając wydłużeń powodują powstawanie pewnych momentów zginających przyspieszających osiągnięcie siły krytycznej dla prętów skrajnych, co zostało zaobserwowane przy ściskaniu każdego modelu.

Także poszczególne odcinki pasów narożnych doznają prawie dokładnie jednakowej siły ściskającej niezależnie od miejsca położenia danego odcinka.

Pierwszy trzask i towarzyszący mu wstrząs modelu zaobserwowano przy 1250 kg siły ściskającej. Od tej chwili tensometry przymocowane do pasów w polach skrajnych zaczęły wykazywać większe skrócenia, niż to obserwowano dla pól środkowych.

Od siły 1460 kg, kiedy usłyszano drugi trzask i zauważono gwałtowne ruchy wskazówek tensometrów, uznano, że dalsze odczyty są niepewne, zaniechano więc ich.

Zniszczenie modelu nastąpiło przy sile ściskającej 1850 kg. Pękły pręty skrajne pasów przy znacznym wychyleniu się krzyżuleców z płaszczyzny ścian również w skrajnych przedziałach.

Pierwsze, zupełnie nieznaczne wychylenie się krzyżuleców z płaszczyzny bocznej zostało spostrzeżone już przy sile 1000 kg. W tym przypadku rozpórki poziome doznawały również znacznie większych przyrostów wydłużeń dopiero przy większych siłach ściskających.

Nie zachodzi więc liniowa zależność między siłami ściskającymi a siłami panującymi w krzyżulecach i rozpórkach.

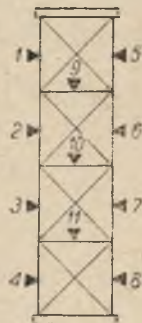
#### 2.4. Modele pozostałe

W podobny sposób zostały przeprowadzone pomiary odkształceń dla modeli o pięciu i sześciu polach. Wyniki pomiarów potwierdzają wnioski wysunięte przy badaniach modeli opisanych *A B* i *C*.

W szczególności model najmniejszy o jednym polu został zniszczony przy sile ściskającej równej 1470 kg. Został złamany jeden słupek narożny przy uprzednim wyboczeniu z płaszczyzny ścian bocznych krzyżuleców w dwu przyległych płaszczyznach.

Model o pięciu polach został złamany siłą 1860 kg, model zaś o sześciu polach zniszczono siłą 1680 kg. We wszystkich przypadkach złamaniu uległy pręty pasów pionowych w skrajnych przedziałach po uprzednim wyboczeniu się skratowań bocznych tych przedziałów.

Żaden z modeli nie wykazał przy tym odkształcalności pasów jako całości, utrzymując w polach środkowych nawet po złamaniu skrajnych prętów początkowy kształt w rzucie poziomym.



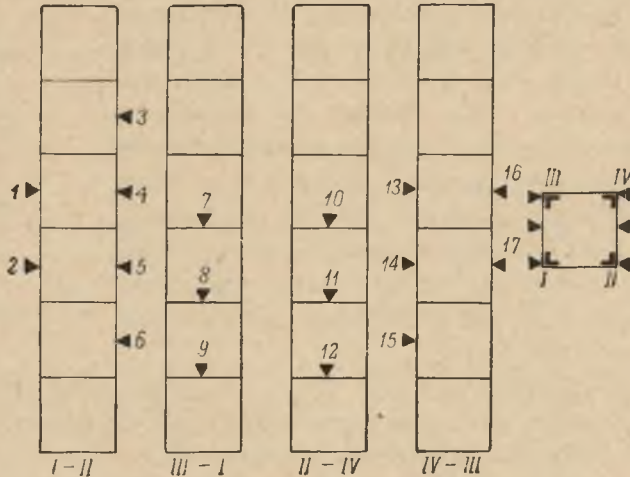
Rys. 7. Model o czterech polach

### 3. Wyniki pomiarów modeli stalowych

#### 3.1. Model bez krzyżuleców

Model został poddany ścisnaniu osiowemu. Tensometry rozmieszczone zgodnie z rysunkiem 8.

Wyniki odczytów na podziałkach tensometrów uwidoczniiono w tabelicy 4.



Rys. 8. Ustrój ramowy obciążony osiowo

Siła krytyczna osiągnęła tu wartość 13 200 kg, powodując odkształcenia się pasów w całości. Dwa pasy zostały wgniecione do środka, drugie dwa — na zewnątrz. Przekrój kwadratowy przed wyboczeniem przeszedł w wydłużony romb. Wszystkie rozpórki poziome okazały się w niedużym stopniu ścisane, jednakże dopiero przy dość znacznych siłach ścisających.

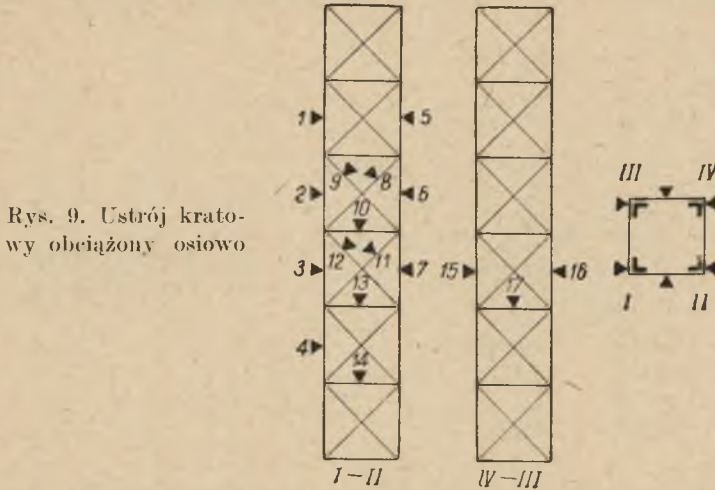
Tablica 4

Siła ścisająca w kg	T e n s o m e t r y																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Odczyty na podziałkach tensometrów																
100	39,9	38,0	40,1	39,9	36,0	37,9	28,2	18,1	19,2	18,0	24,9	25,8	40,1	37,0	36,5	39,2	39,0
500	39,5	37,5	38,9	38,4	35,5	38,0	28,2	18,1	19,1	18,2	24,8	25,9	39,1	36,8	36,3	38,9	38,5
1 000	38,8	36,9	37,2	37,0	34,1	36,9	28,3	18,2	19,2	18,5	25,0	26,0	38,0	35,1	35,2	38,1	38,0
2 000	37,1	35,0	35,9	34,8	32,5	33,0	28,3	18,3	19,3	18,8	25,5	26,1	35,0	34,0	33,9	36,9	36,2
3 000	35,9	33,4	34,1	32,8	30,3	30,8	28,4	18,5	19,3	18,8	25,9	26,5	33,6	31,5	29,1	34,9	34,0
5 000	32,4	30,6	31,0	29,0	26,9	27,0	28,5	18,4	19,0	18,9	25,9	26,1	30,0	29,2	26,1	31,0	31,3
7 000	28,9	26,7	27,0	25,2	23,2	23,2	28,6	18,2	18,5	18,6	24,7	25,8	26,1	27,1	25,0	26,7	26,9
9 000	25,1	23,1	24,1	20,8	20,0	19,0	28,0	18,0	17,9	18,0	24,1	24,9	23,0	24,0	23,8	22,3	22,1
11 000	22,0	20,1	21,2	15,9	16,0	14,8	27,2	17,3	15,2	17,1	23,0	23,7	19,9	21,0	19,5	17,9	20,1
13 000	17,4	16,0	16,8	13,1	9,1	12,5	26,7	15,2	13,0	15,0	22,1	22,0	15,4	17,2	17,9	13,5	16,5

3.2. Model o sześciu polach — krzyżulce  $\varnothing 10$  mm

Model ten poddano także sile ściskającej środkowo rozmieszczając tensometry według rysunku 9.

Zestawienie odczytów na podziałkach tensometrów zawiera tablica 5.



Zniszczenie modelu nastąpiło przez wyboczenie się pasa narożnego w skrajnym polu przy sile przekraczającej nieco 17 000 kg.

Wszystkie pasy i krzyżulce były ściskane mniej więcej równomiernie, rozpórki poziome zaś znacznie rozciągane.

Całkowite wydłużenia rozpórek okazały się większe od całkowitych skróceń krzyżulców.

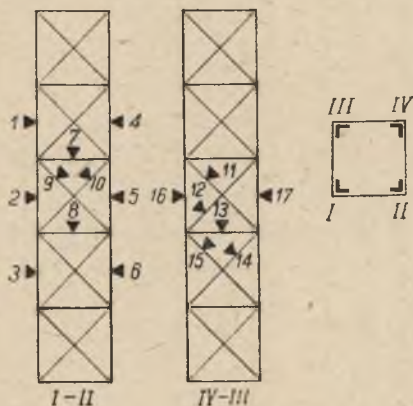
Tablica 5

Siła ściskająca w kg	T e n s o m e t r y																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Odczyty na podziałkach tensometrów																	
100	33,5	34,0	37,2	36,0	39,8	37,1	38,4	40,2	39,1	20,0	38,2	40,0	20,9	21,1	39,0	40,0	22,0
500	33,2	33,8	37,1	35,5	39,7	37,0	38,2	40,1	39,2	20,5	38,1	39,1	20,8	21,1	38,9	39,8	22,2
1 000	32,0	31,8	36,2	34,0	39,2	36,5	37,0	39,9	39,0	21,1	37,9	38,6	21,1	22,0	39,1	39,5	22,7
2 000	30,5	30,9	35,0	31,4	37,8	35,2	34,5	39,3	38,9	22,0	37,4	38,0	21,9	23,1	38,9	38,7	23,5
3 000	29,0	28,9	32,2	27,8	36,5	33,0	33,1	38,5	37,2	23,5	36,8	37,3	23,2	24,4	36,1	36,9	24,2
5 000	27,1	26,0	30,0	24,6	34,1	31,2	30,8	37,0	36,9	26,0	36,1	36,2	25,8	25,7	35,2	35,0	25,7
7 000	25,9	24,5	27,2	21,4	32,2	29,1	27,1	36,2	36,3	27,5	36,0	35,2	27,1	27,0	33,9	34,1	27,2
9 000	24,6	23,0	24,0	18,0	29,9	27,0	24,0	36,0	36,1	28,9	35,1	34,1	28,1	28,3	21,0	33,2	28,9
11 000	23,1	21,4	21,5	15,6	27,4	24,4	21,8	35,1	35,2	30,2	34,0	33,2	30,2	28,8	29,4	31,4	30,0
13 000	22,0	19,8	18,9	13,7	24,0	23,0	20,0	34,5	34,2	32,0	32,9	32,4	31,8	30,0	27,6	30,4	31,9
15 000	19,5	17,2	16,5	11,2	21,3	20,2	17,3	33,8	33,6	33,1	31,0	31,2	32,6	31,5	24,7	29,2	33,0
17 000	17,0	16,0	14,6	10,0	18,1	16,1	15,1	31,5	32,0	34,0	30,1	30,6	33,0	33,9	21,9	27,1	34,8

3.3. Model o pięciu polach — krzyżulce  $\phi 10$  mm

Rozmieszczenie tensometrów widoczne jest na rysunku 10.

Zestawienie odczytów tensometrów zawiera tablica 6. Tutaj wydłużenie rozpórek poziomych wypadło również nieco większe od całkowitego skrócenia krzyżulew. Wyboczony został pas narożny na dwóch skrajnych



Rys. 10. Ustrój kratowy obciążony osiowo

polach znajdujących się obok siebie. Siła, od której zaobserwowano krzywienie się pasa narożnego, przekroczyła nieco 19 000 kg.

Wzrost wielkości siły krytycznej dla modelu o pięciu polach jest zgodny z wynikami rozważań teoretycznych, z których wynika, że ustrój smuklejszy powinien być wybaczany mniejszą siłą.

Tablica 6

Siła ścisniająca w kg	T e n s o m e t r y																
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Odczyty na podziałkach tensometrów																
100	37,2	39,0	35,0	40,0	38,6	37,6	22,5	30,0	20,0	20,0	39,8	39,2	30,0	40,0	40,0	34,8	35,0
1 000	37,0	38,0	34,0	38,0	37,2	36,0	21,9	29,0	20,2	20,4	39,1	39,1	30,0	39,8	39,2	34,6	34,5
2 000	36,0	37,0	32,9	36,3	36,4	34,2	21,2	29,2	19,8	20,0	38,5	38,6	30,2	39,0	39,0	33,5	33,8
3 000	35,1	35,2	31,4	34,1	34,1	32,2	22,8	30,2	19,0	19,5	38,0	38,0	30,9	38,0	38,3	32,2	33,4
4 000	34,2	34,0	30,0	32,2	31,5	30,0	23,2	30,7	18,2	18,9	36,9	37,4	31,4	37,1	37,5	30,7	32,1
5 000	33,5	32,5	28,9	30,8	29,4	28,1	24,3	31,9	17,6	18,0	36,0	36,9	32,3	36,2	36,8	28,2	30,5
7 000	31,5	30,5	26,0	27,1	26,2	25,0	25,5	33,4	16,9	17,1	35,2	36,0	33,7	35,4	36,0	25,4	28,6
9 000	29,8	27,4	23,0	23,6	21,5	23,0	26,8	34,5	16,2	16,4	34,6	35,3	35,0	34,1	35,1	22,5	26,2
11 000	26,6	24,8	20,0	21,0	19,5	20,1	27,8	35,6	15,0	15,7	33,8	34,7	36,2	32,8	34,8	19,6	24,0
13 000	23,8	21,6	17,5	18,5	17,0	17,1	29,0	36,9	14,1	14,9	33,0	34,0	37,5	31,5	33,0	16,3	21,1
15 000	20,8	19,0	15,0	15,0	14,7	14,0	30,2	38,0	13,0	14,1	31,8	33,1	38,8	30,2	31,7	14,2	19,3
17 000	17,1	17,5	12,2	12,2	11,8	10,8	31,8	39,2	12,0	13,1	30,9	32,1	40,0	29,0	30,8	13,0	17,0
18 000	15,9	14,0	11,0	9,5	8,5	8,0	33,4	40,5	11,1	12,3	30,1	30,8	41,0	28,2	30,0	10,2	14,1
19 000	14,0	11,9	9,5	7,0	6,0	6,1	33,2	42,0	10,2	11,2	29,4	29,0	43,0	27,1	29,2	8,0	11,0

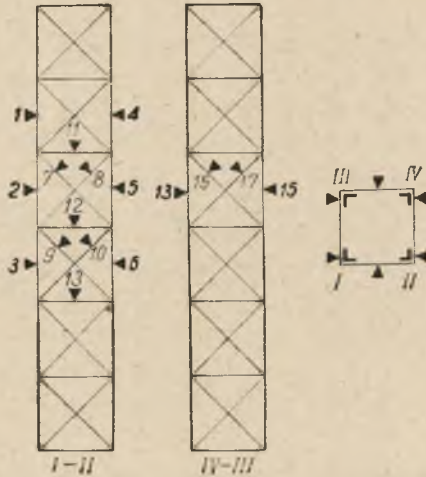
3.4. Model o sześciu polach — krzyżulce  $\phi 10$  mm

Tensometry rozmieszczono według rysunku 11.

Zestawienie odczytów na podziałkach tensometrów zawiera tablica 7.

Wyboczenie nastąpiło przy sile przekraczającej 18 000 kg. Skręceniu uległ pas narożny w części dolnej modelu.

Rys. 11. Ustrój kratowy obciążony osiowo



Zastosowanie krzyżulców o większym przekroju poprzecznym, tj. równym  $1,0 \text{ cm}^2$ , zamiast poprzednio stosowanych  $\phi 10$  mm o powierzchni przekroju  $= 0,785 \text{ cm}^2$ , spowodowało pewne zwiększenie się siły krytycznej.

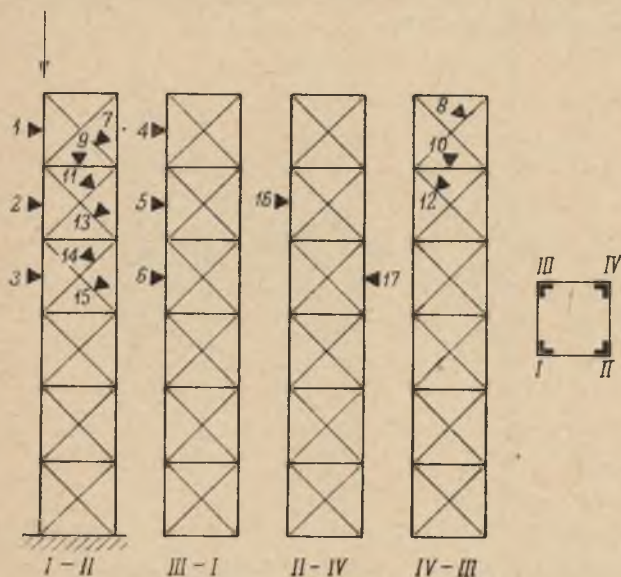
Także stosunki odkształceń krzyżulców i rozpórek uległy zmianie wykazując mniejsze różnice w wartościach bezwzględnych.

Tablica 7

Siła ściskająca w kg	T e n s o m e t r y																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Odczyty na podziałkach tensometrów																
100	36,2	39,0	37,4	40,3	35,7	35,0	40,0	37,8	40,0	40,8	24,0	20,0	27,0	40,0	40,0	20,0	20,0
1 000	35,8	37,5	37,0	40,0	34,9	34,5	39,8	37,3	39,8	40,0	31,0	20,0	27,1	39,1	39,5	20,0	19,8
2 000	34,7	36,0	35,8	39,1	33,2	33,3	38,5	37,1	39,0	39,4	24,9	30,1	27,5	38,0	38,4	19,5	19,4
3 000	33,5	35,0	34,7	38,0	32,0	32,5	38,0	36,3	38,0	38,5	25,3	20,8	28,4	36,9	37,5	18,8	18,9
4 000	32,4	34,0	33,7	37,0	30,7	31,4	37,2	35,7	37,2	37,6	25,8	21,5	29,1	36,0	36,6	18,0	18,2
5 000	31,1	33,1	32,6	35,9	29,0	30,1	36,0	34,7	36,3	36,5	26,6	22,1	30,0	34,8	37,7	17,1	17,6
7 000	28,9	31,2	30,0	32,8	26,3	28,2	35,1	33,6	34,8	35,0	27,5	23,5	30,9	32,5	34,0	15,8	16,4
9 000	26,5	29,7	27,2	30,5	24,1	26,0	33,5	32,0	33,4	33,8	28,4	24,5	32,5	30,3	31,5	14,3	15,3
11 000	24,0	27,1	25,3	28,2	21,0	23,9	32,3	30,3	32,4	32,6	29,2	25,6	33,6	28,0	29,5	12,9	14,0
13 000	21,5	25,0	23,1	26,0	18,0	21,5	30,8	29,0	31,1	30,9	30,1	26,5	34,6	25,8	27,1	11,5	13,0
15 000	19,4	23,0	20,0	23,9	15,7	18,4	29,2	27,8	30,0	29,5	31,1	27,7	35,8	23,5	25,0	10,1	11,9
17 000	17,0	20,2	17,8	20,7	12,8	15,0	28,0	26,5	28,6	27,8	32,2	29,0	37,2	21,2	22,6	9,4	19,8
18 000	15,2	18,4	16,5	19,0	11,2	13,4	27,1	25,6	27,5	26,8	33,0	30,1	38,3	20,0	20,8	8,2	9,5

## 3.5. Model o sześciu polach — ściskany mimośrodowo

Użyto modelu o identycznych wymiarach jak pod 3. 4. Rozmieszczenie tensometrów obrazuje rysunek 12.



Rys. 12. Ustrój kratowy obciążony mimośrodowo

Zestawienie odczytów na tensometrach zawiera tablica 8. Model pod wpływem siły ściskającej działającej na jedną parę pasów został wygięty w całości, przenosząc siłę 11 000 kg, która spowodowała jego skrzywienie.

Tablica 8

Siła ściskająca w kg	T e n s o m e t r y																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Odczyty na podziałkach tensometrów																
100	34,0	37,0	40,0	40,0	40,1	36,0	29,5	30,0	20,0	19,5	32,2	21,2	39,5	35,0	28,1	31,9	30,0
1 000	33,1	36,0	39,4	38,5	39,0	34,9	28,0	29,0	20,0	19,8	32,0	20,8	39,1	35,0	28,0	31,8	29,5
2 000	31,5	32,4	37,0	36,6	38,0	33,3	25,9	27,5	20,6	20,3	31,3	20,3	38,9	34,9	27,5	31,5	29,5
3 000	30,0	30,0	35,1	34,2	36,4	30,9	23,6	26,0	21,0	21,0	31,1	19,5	38,5	34,7	27,2	31,9	30,0
4 000	27,3	27,0	32,0	31,6	33,0	28,1	21,8	24,1	21,7	21,4	30,6	18,8	38,0	34,1	26,8	32,0	30,6
5 000	24,1	24,5	29,5	28,9	29,1	25,1	20,1	21,8	22,4	21,9	30,0	17,9	37,8	34,0	26,1	32,2	31,3
6 000	21,8	22,0	27,2	27,8	25,9	22,0	17,5	19,5	23,2	22,5	29,5	16,0	37,5	33,4	25,5	32,5	32,0
7 000	19,0	19,0	24,3	24,5	22,5	18,8	15,4	17,6	24,0	23,3	28,8	15,1	37,0	33,0	25,0	32,9	32,8
8 000	15,8	16,0	21,0	21,9	20,0	15,5	12,0	15,3	24,8	24,2	28,0	14,4	36,4	32,6	24,3	33,2	33,9
9 000	12,5	13,0	17,9	18,4	17,0	12,0	9,8	12,0	25,8	25,1	27,1	13,6	35,7	32,0	22,6	33,8	35,0
10 000	9,8	10,5	14,5	15,6	14,2	9,2	7,9	9,6	26,9	26,1	26,0	12,7	34,0	31,5	20,9	34,8	36,1
11 000	6,5	8,5	10,8	12,4	10,8	5,8	6,5	7,8	28,0	27,2	24,8	11,9	33,1	30,7	20,0	35,9	37,5

Bezpośrednim powodem zniszczenia było pęknięcie spoin w górnych rozpórkach poziomych.

Pierwszy krzyżulec wychodzący z węzła bezpośrednio obciążonego wykazuje skrócenia tego samego rzędu co skrócenie pasów pionowych po stronie ściskanej.

Pasy pionowe bezpośrednio nie obciążone początkowo nie wykazywały prawie żadnych odkształceń, by następnie doznać wyraźnie zaznaczającego się rozciągania. Krzyżulce w polach środkowych wykazały mniej więcej takie same skrócenia jak przy ściskaniu osiowym.

#### 4. Wnioski

1. Trzony nie posiadające skratowań w płaszczyźnie ścian wyboczają się w całości, zanim nastąpi utrata stateczności pasów na odległości międzywęzłowej.

2. Pełne współdziałanie skratowań bocznych następuje dopiero przy obciążeniach bliskich obciążeniom krytycznym.

3. W trzonach skratowanych wyboczeniu ulegają przede wszystkim przedziały skrajne pasów narożnych.

4. Dla obciążenia przekazywanego się tylko na skrajne dwa pasy maksymalną siłę ściskającą określamy na podstawie dopuszczalnego odchylenia od linii prostej całego trzonu.

5. Trzony wież poddane wpływom odbudowy górniczej powinny mieć skratowania ścian bocznych odporne na wyboczenie z płaszczyzny ściany.