

STEFAN BRYŁA

WPŁYW DOSPOJONYCH PRZEPOŃ
NA WYTRZYMAŁOŚĆ
DŹWIGARÓW WALCOWANYCH

ODBITKA Z CZASOPISMA „PRZEGLĄD TECHNICZNY” Nr. 17 Rok 1935

W A R S Z A W A

1935

STEFAN BRYŁA

WPLYW DOSPOJONYCH PRZEPON
NA WYTRZYMAŁOŚĆ
DŹWIGARÓW WALCOWANYCH

624.093

ODBITKA Z CZASOPISMA „PRZEGLĄD TECHNICZNY” Nr. 17 Rok 1935

W A R S Z A W A

1935

DRUKARNIA TECHNICZNA
Sp. Akc.
Warszawa, ul. Czackiego 3/5
Telef.: 614-67 i 277-98

BIBLIOTEKA
WYDZ.
ARCHITEKTURY

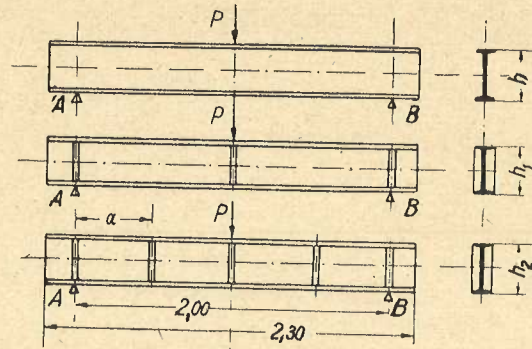
2415

Dźwigary walcowane oblicza się z reguły na zginanie danym momentem M przy pomocy wzoru:

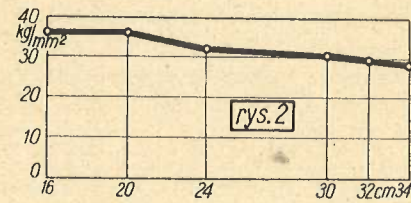
$$\sigma = \frac{M}{W}, \dots \dots \dots (1)$$

gdzie σ jest naprężeniem normalnym na krawędzi stopki w przekroju poprzecznym, zaś W — modułem przekroju (inaczej momentem wytrzymałości albo wskaźnikiem wytrzymałości). Za σ przyjmujemy naprężenie dopuszczalne k , będące n -tą częścią granicy wytrzymałości ($n = \sim 3$), względnie granicy plastyczności ($n = \sim 2$). Projektowanie przy pomocy wzoru (1) jest uzasadnione, o ile mamy pewność, że zwiększając dowolnie moment M dochodzimy do kresu wytrzymałości belki przez jej złamanie w płaszczyźnie obciążenia. Tak się rzecz ma istotnie w przypadku belki długiej i niskiej, zabezpieczonej odpowiednio przeciw zwichrzeniu, t. j. odkształceniu w płaszczyźnie poziomej. Moduł przekroju W jest tu rzeczywiście miarą (wskaźnikiem) wytrzymałości belki. Zwiększając go, zwiększamy proporcjonalnie moment M , jaki belka udźwignie, ale tylko do pewnej granicy. Jeżeli belka jest stosunkowo wysoka, to do głosu przychodzi naprężenia normalne w przekroju poziomym przez ściankę σ_z , w miejscu działania siły

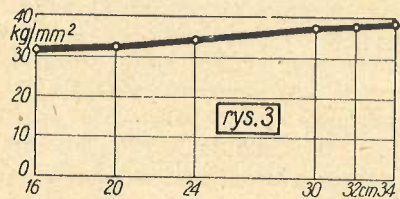
skupionej i łatwo może się zdarzyć, że staną się one niebezpieczniejsze od naprężeń σ . W takim



Rys. 1 a, b, c.



Rys. 2.

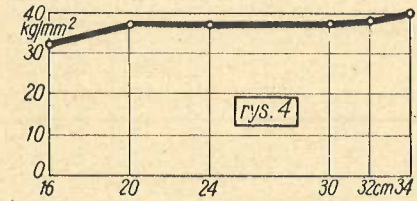


Rys. 3.

wypadku zwiększenie momentu M powoduje zgniot stópki bezpośrednio obciążonej, zgniot ścianki tuż

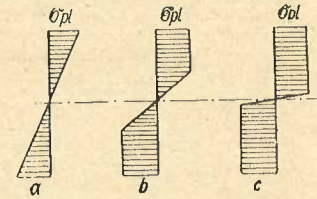
pod siłą skupioną, a w następstwie tego złamanie przedwczesne, t. j. przyspieszone nagłym zmniejszeniem modułu przekroju, który zatem przestaje być miarą wytrzymałości.

Na naprężenie σ_z zwrócił uwagę prof. Huber¹⁾



Rys. 4.

Przyspojenie przepon do dwuteówek w miejscu działania sił skupionych, na wzór żeber w blachownicach, może niebezpieczeństwo zgniotu opóźnić, jeżeli nie uchylić, i ważność wzoru (1) przywrócić także belkom stosunkowo wysokim, a niebardzo długim, zdarzającym się przecież często w praktyce (podłużnice i poprzecznice w mostach, podciągach). Celem zbadania wpływu takich przepon wykonano poniższe doświadczenia.

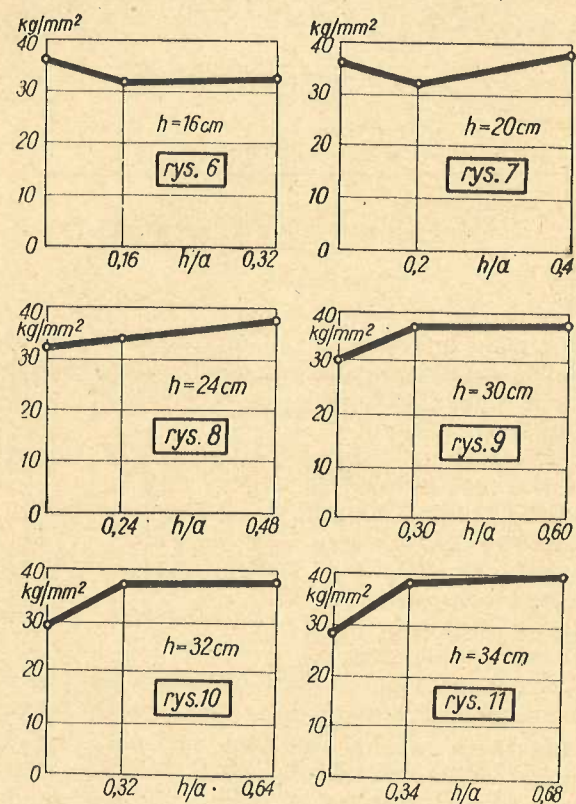


Rys. 5.

Badania wykonano w dwu serjach. Pierwsza obejmuje 16 belek dwuteowych Nr. 16, 20, 24 i 30, dostarczonych przez Tow. Akc. „Perun”, a badanych przez Instytut Badań Inżynierji w Warszawie.

¹⁾ M.T. Huber: Studja nad belkami o przekroju I (dwuteowymi). Sprawozdania i prace Warszawskiego Tow. Politechnicznego 1923, zeszyt 1 i 2-gi.

Druga serja obejmuje 6 belek Nr. 32 i 34. Spawania tej serji dokonała firma *Kozłowski*, zaś badanie przeprowadziła Mechaniczna Stacja Doświadczalna przy Politechnice Lwowskiej.



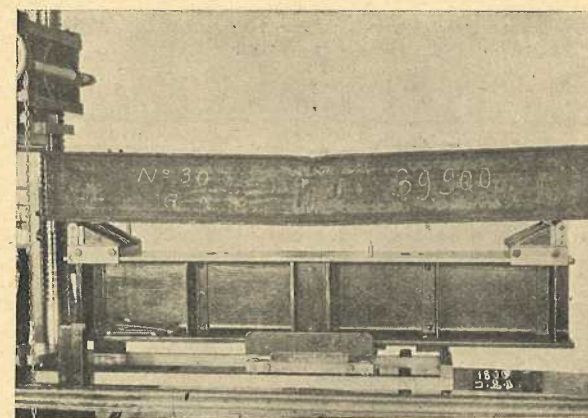
Rys. 6—11.

Wszystkie belki, o rozpiętości $L = 200\text{ cm}$, poddano próbom na zginanie przez obciążenie ich w środku rozpiętości siłą skupioną na maszynie *Amslera*. Badane były trzy rodzaje belek (rys. 1).

1. Belki bez przepon, po jednej z każdego numeru dwuteówki (por. rys. 1a).

2. Belki z trzema przeponami (por. rys. 1b), umieszczonemi nad oporami i pod siłą skupioną, t. j. w odległościach 1 m od siebie. Takich belek było po dwie w każdej wysokości serji 1-ej i po jednej w serji 2-ej.

3. Belki z pięciu przeponami co 50 cm, (por. rys. 1c), z których 3 były, jak wyżej, w miejscach działania sił skupionych, (reakcyj i siły P). Belek



Rys. 12.

tego rodzaju było tyle, ile numerów dwuteówek, t. j. po jednej w każdej wysokości. W serji 1-ej (warszawskiej) obciążenie P zwiększano od 0 skokami co 5 t, mierząc za każdym razem ugięcie f , aż do siły „niszczącej” R , notując także siłę Q na granicy płynności (tab. 1). W serji 2-ej (lwowskiej) obciążenie zwiększano od 0 do pewnej wartości, będącej w przybliżeniu wielokrotnością 5 tonn (lub 10 tonn), mierzono ugięcie f (całkowite), następnie odciążano dla pomierzenia ugięcia trwa-

tego f_1 . Maksymalne obciążenie R nazwano tu obciążeniem na granicy plastyczności.

Zestawienie sił Q i R daje tab. 1.

W tabeli 2-jej R_0 oznacza tę wartość R z tab. 1, która odpowiada belkom bez przepon, R_3 – belkom z 3-ma, zaś R_5 belkom z 5-ma przeponami. Kolumny tabeli podają różnice sił w tonnach i w odsetkach odjemnika. Z różnic $R_3 - R_0$ wynika, że w belkach wyższych dodanie do dwuteowników 3 przepon (w miejscach działania sił skupionych) zwiększa ich wytrzymałość R procentowo tem więcej, im wyższa jest belka.

Dodanie 3-ch przepon w belkach Nr. 16 i 20 nie zwiększyło wytrzymałości.

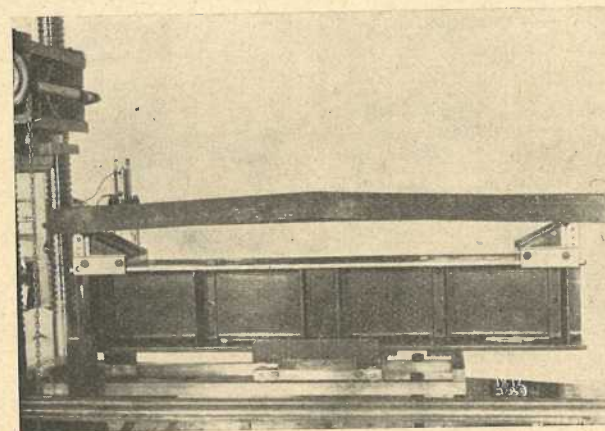
TABELA 1.

Serja	I Nr.	Ilość przepon	L. p. próbki	Q t	Q_{sr} t	R t	R_{sr} t
1-sza (warszawska)	30	0	17515	30	38,25	39,9	48,45
		3	16	38,5		49,9	
		3	17	38		47	
		5	18	39,5		48,3	
	24	0	19	18,5	19,375	22,9	23,85
		3	20	19		23,5	
		3	21	19,75		24,2	
		5	22	21		26,3	
	20	0	23	12,5	11,95	15,4	13,75
		3	24	12		13,8	
		3	25	11,9		13,7	
		5	26	13,3		15,8	
16	0	27	6,9	6,8	8,6	7,425	
	3	28	6,8		7,45		
	3	29	6,8		7,4		
	5	30	6,8		7,6		
2-ga (lwowska)	32	0	917/1			46	
		3	2			58,5	
		5	3			59,5	
34	0	4				51	
	3	5				69,5	
	5	6				72,5	

TABELA 2.

I Nr.	$R_3 - R_0$		$R_5 - R_3$		$R_5 - R_0$	
	t	%	t	%	t	%
16	- 1,175	- 13,7	0,175	2,36	- 1,0	- 11,6
20	- 1,75	- 11,3	2,05	14,9	0,4	2,6
24	0,95	4,15	2,45	10,27	3,4	14,8
30	8,55	21,4	- 0,15	- 0,31	8,4	21,0
32	12,5	27,2	1,0	1,71	13,5	29,4
34	18,5	36,3	3,0	4,6	12,5	42,2

Dodanie jeszcze dwu przepon zwiększa również naogół wytrzymałość prócz Nr. 30, ale w sposób mniej wyraźny (różnice $R_5 - R_3$). Ostatnia kolum-



Rys. 13.

na stwierdza przyrost wytrzymałości dwuteówki (prócz Nr. 16) przez dospojenie 5 przepon. Przyrost ten rośnie procentowo wraz ze wzrostem wysokości belki.

Jeżeli w równaniu (1) przyjmiemy $\sigma = 1200 \text{ kg/cm}^2$, to ponieważ:

$$M = \frac{P L}{4}, L = 200 \text{ cm}, \dots (2)$$

to otrzymamy udźwig bezpieczny

$$P_b = \frac{4 \sigma W}{L} = \frac{4 \cdot 1200}{200} W = 24 W.$$

Stopień bezpieczeństwa

$$n = \frac{R}{P}.$$

Stosunek udźwigu R do udźwigu bezpiecznego podaje tab. 3. Znaczek przy n oznacza ilość przepon. Z tabeli tej wynika, że, wyjąwszy Nr. 16 i 20, $n_0 < n_3 < n_5$, t. j., że przez dodanie przepon bezpieczeństwo rośnie.

TABELA 3.

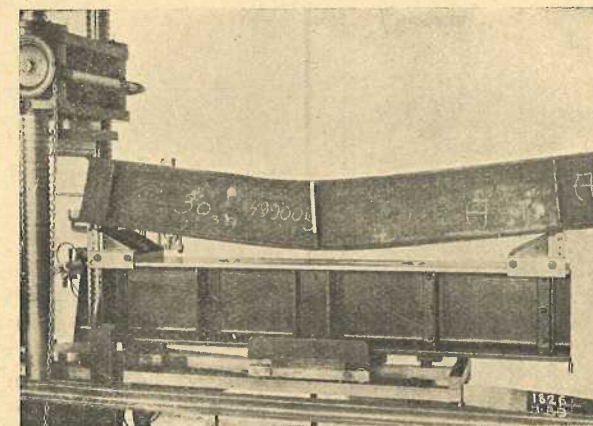
serja	I Nr.	W_0 cm	P_b t	n_0	n_3	n_5
1-sza	16	117	2,81	3,06	2,98	3,05
	20	214	5,14	3	2,68	3,08
	24	354	8,50	2,7	2,80	3,10
	30	653	15,67	2,55	3,09	3,08
2-ga	32	782	18,75	2,45	3,12	3,16
	34	923	22,32	2,28	3,12	3,25

Wysokie wartości n_0 dla belek I Nr. 16 i 20, które są sprzeczne z powyższym twierdzeniem, tłumaczą się wyjątkowo pomyslnym zbiegiem okoliczności, dzięki którym belka I Nr. 20 bez przepon podczas próby nie uległa prawie wcale wzdłużeniu. Należy przypuszczać, że była ona wyjątkowo spóśrodkowo obciążona, t. j. że linja siły

skupionej wpadała idealnie w oś symetrii przekroju belki. Jeżeli pominiemy dwa te wyniki, to możemy z tab. 3 zauważyć, że n_0 maleje, zaś n_3 rośnie ze wzrostem wysokości belki. Co się tyczy n_5 , można powiedzieć, że jest prawie stałe i w każdym wypadku większe od n_0 .

Podstawmy (2) w (1), to otrzymamy

$$\sigma = \frac{P L}{4 W} = P \frac{50}{W} \text{ cm} \dots (3)$$



Rys. 14.

Podstawiając za P odpowiednie Q_i i R z tab. 1, zaś W z tab. 3 zestawiliśmy tabelę 4, która do pewnego stopnia usuwa wpływ różnorodności numerów dwuteówek, czyli wpływ zmienności modułu przekroju W i pozwala wykryć wpływ zmienności innych czynników na wytrzymałość belek przy zginaniu.

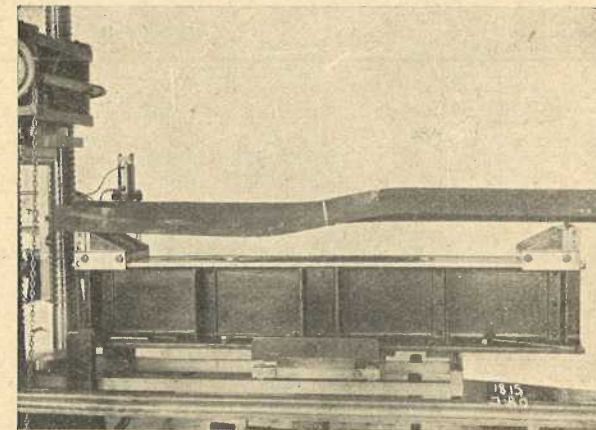
TABELA 4.

I Nr.	Ilość przepon	σ kg/mm ² w zależności od	
		Q	R
16	0	29,5	36,8
	3	29	31,7
	5	29	32,5
20	0	29,2	36
	3	27,9	32,2
	5	31	36,9
24	0	26,2	32,4
	3	27,4	33,8
	5	29,7	37,2
30	0	23	30,6
	3	29,3	37
	5	30,2	37
32	0		29,4
	3		37,4
	5		38,0
34	0		27,7
	3		37,7
	5		39,3

Treść tabeli 4 obrazują przejrzystość rys. 2—4. Na osiach odciętych odmierzone są wysokości belek w cm, na osiach rzędnych naprężenia σ w kg/mm². Rys. 2 odnosi się do belek bez przepon, rys. 3 do belek z 3-ma przeponami, rys. 4 do belek z 5-ma przeponami. Gdyby materiał belek był idealnie jednolity, doświadczenia były wykonane w idealnych warunkach, wykluczających zwichrzenie i gdyby o wytrzymałości decydowała wartość wg wzoru 1, to linje σ w zależności od P , Q , R byłyby idealnie poziome.

Gdyby ponadto wykres naprężeń w niebezpiecznym przekroju belki, w chwili osiągnięcia wartości Q , względnie R , przez siłę obciążającą, odpowiadał prawu Hooke'a, wg rys. 5a, to rzędna wykresów Q , względnie R , byłaby równa granicy

plastyczności, względnie granicy wytrzymałości stali. Jednak z powodu plastyczności, wykres naprężeń, po osiągnięciu przez włókna skrajne granicy plastyczności, przybiera postać linii łamanej (rys. 5b), a nośność belki wyczerpuje się dopiero wtedy gdy prosta ukośna zbliża się całkowicie do osi obojętnej (rys. 5c). Dla belki prostokątnej dąłoby to zwiększenie udźwigu o 50%, dla belki dwuteowej zaś — o ok. 17%. Wskaźnik wytrzyma-



Rys. 15.

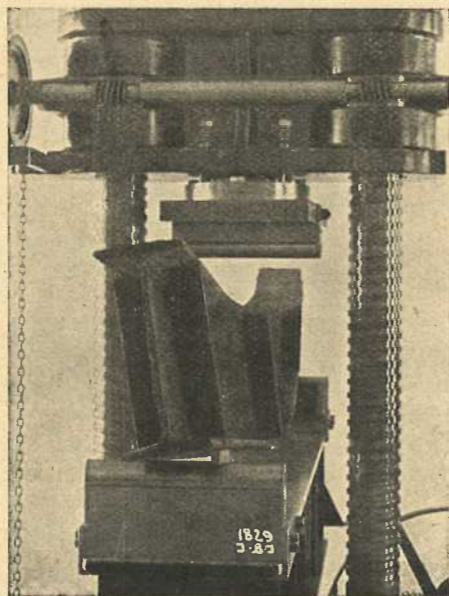
łości W wzrasta więc do wartości $1,17 W$, jeżeli wzór (1) ma być ważny po osiągnięciu przez P wartości Q wg tab. 1²⁾. Wartości tab. 4 należałyby więc podzielić przez $1,17$ i w tym stosunku zmniejszyć rzędne wykresów na rys. 2—4.

Można zauważyć, że wykresy na rys. 2 spadają, zaś wykresy R_3 i R_5 (rys. 3 i 4) wznoszą się w prawo. Spadek R_0 i Q_0 ze wzrostem wysokości belki byłby jeszcze wyraźniejszy, gdybyśmy w doświadczeniach naszych uchronili belki zginane od

²⁾ Bleich: Stahlhochbauten, Berlin 1932, tom I, str. 400

zwichrzenia, na które szczególnie czuła jest belka I Nr. 16, jako najslabsza, a tej samej rozpiętości, co inne.

Wspomniane wznoszenia się wykresów R_3 i R_5 wytłomaczyć można tylko zjawiskiem zwichrzenia: im większy jest rozmiar dwuteownika usztywnionego, tem trudniej przy stałej rozpiętości o zwichrzenie, które zatem później wystąpi i mniej za-



Rys. 16.

szkodzi belce. Zjawisko zwichrzenia belek badał *Timoszenko* według swojego sposobu przybliżonego i opracował dla szeregu przypadków wzory na naprężenie krytyczne, powyżej których ugięcie belki w płaszczyźnie obciążenia przestaje być statyczną formą równowagi, a staje się nią ugięcie wichrowate. *Timoszenko* przyjmował w swoich

wzorach końce belek przytrzymane, tak, iż osie symetrii przekrojów poprzecznych nad podporami nie mogą się wychylić z pionowej płaszczyzny obciążenia. W naszych doświadczeniach takiego przytrzymania końców belek nie było, zatem zwichrzenie było dużo łatwiejsze i przy pomocy wzorów prof. *Timoszenki* śledzić go nie można.

Timoszenko badał także związek pomiędzy naprężeniami normalnymi σ , a możliwością pomarszczenia się ścianki w miejscach największego momentu, tudzież wpływ naprężeń stycznych τ , na ewentualne pomarszczenie się ścianki w miejscach największych sił poprzecznych. Badał także wpływ żeber w obu powyższych przypadkach i doszedł do wniosku, że w pierwszym przypadku zebra nic pomóc nie mogą. Na szczęście w dwuteownikach walcowanych grubość ścianki jest wystarczająca przeciw pomarszczeniu się z powodu nadmiernych naprężeń normalnych σ . W przypadku 2-gim wpływ żeber jest korzystny, a naprężenie krytyczne τ zależne jest od stosunku $h:l$ gdzie l jest odległością żeber, h wysokością belek. Dla danej rozpiętości L , wysokości h i danego sposobu obciążenia belki, najw. τ jest proporcjonalne do najw. σ . Wobec tego nie będzie od rzeczy dla każdego numeru belki wykreślić związek pomiędzy stosunkiem $h:l$, a wartością σ z tab. 4. Wykresy te (rys. 6—11) wykazują przejrzyste wzrost wytrzymałości przez dodanie 3 przepon i dalszy wzrost przez dodanie jeszcze dwu przepon.

Ponieważ jednak na ścianach belek zniszczonych nie zauważono fałdów, odpowiadających przekroczeniu τ_{hr} , przeto nie można dodatniego wpływu przepon tłumaczyć wielkością τ . Raczej należy stwierdzić, że tak ze względu na τ_{hr} , jak i na σ_{hr} , grubość ścianki dwuteowników walcowanych jest (przynajmniej w naszym przypadku obciążen) dostateczna. — Cóż więc jest powodem zmniej-

szania się naprężenia σ ze wzrostem wysokości h w belkach bez przepon i czem wytłomaczyć, że dodając przepony zwiększamy wytrzymałość przeciw złamaniu i to tem więcej, im większy jest przekrój dźwigara? Aby na to pytanie odpowiedzieć, zwróćmy uwagę na fotografie.

Orzeczenie Instytutu Badań Inżynierji opatrzone jest 34 fotografjami, z których przytaczamy rys. 12—20, ilustrującemi każdą belkę po dokonanej próbie, zarówno w widoku na ściankę, jak i na stopkę. Na fotografjach stopek rys. 13, 15, 17, 20, widać wyraźnie wielkość i rodzaj zwichrzenia. Zwichrzenie u belek z przeponami wykazuje dwie półfale z punktem przegięcia w środku, przy czem jedna stopka pozostaje niezwichrzona (rys. 15). U belek bez przepon (rys. 13) obserwujemy natomiast zwichrzenie według jednej półfali, przy czem belki I Nr. 30 i 24 wygięły się w bok obu stopkami, I Nr. 24 zaś tylko jedną stopką, gdy druga została niemal prosta. Wreszcie w belce I Nr. 16 (rys. 20) jedna stopka została prosta, zaś druga (ściskana) wygięła się poziomo esowato (t. j. według 2 półfal). Widocznie zatem przepony sprzyjają tworzeniu się dwu półfal, przez co niewątpliwie zwiększają siłę krytyczną, od której zwichrzenie się zaczyna.

Więcej widać na fotografjach z widokiem na ściankę. Belki z przeponami wygięły się mocno w całości, a więc zarówno stopka górna, jak i dolna (rys. 14, 16 i 18). Belki zaś bez przepon pozostały proste (Nr. 30 i 24, rys. 12) lub ugięły się tylko nieznacznie (Nr. 20 i 16, rys. 19). Belki I Nr. 16 wykazują wogóle mniejsze ugięcie, bez względu na to, czy są z przeponami, czy bez. W belkach bez przepon obserwujemy zmiążdżenie pasa górnego pod siłą obciążającą i to tem większe, im większa wysokość (rys. 12). W belce I Nr. 16 zmiążdżenia takiego niema. (rys. 19).

Wogóle im większa wysokość, tem większy wpływ mają przepony na odkształcenie belek. Wynika stąd, że w belkach z przeponami nie wiele już brakowało do złamania, wytrzymałość ich na zginanie była więc prawie wyczerpana. W belkach zaś bez przepon do stanu takiego nie doszło, zniszczenie nastąpiło przez zgniot. W belkach I Nr. 16 zniszczenie nastąpiłoby niezależnie od przepon, przez złamanie. Wspomniany zgniot, obserwowany na wysokich dwuteownikach bez przepon, przy stosunkowo niewielkich naprężeniach σ , każe się domyślać, że nie one tu decydowały, lecz naprężenia normalne w przekroju poziomym przez ściankę, tuż poniżej stopki w miejscu obciążenia siłą skupioną, jak to już wspomnieliśmy na wstępie. Prof. Huber nazywa je naprężeniami poprzecznymi i poświęcił im kilka paragrafów swego znakomitego dzieła: Studja nad belkami o przekroju I (dwuteowemi). Uważając ściankę za sprężyste podłoże, na którem leży belka o postaci stopki, znalazł prof. Huber, w przypadku siły skupionej P największe naprężenie poprzeczne pod tą siłą:

$$\sigma_z = \alpha \cdot \frac{P}{F}, \dots \dots \dots (4)$$

gdzie F jest przekrojem belki I.

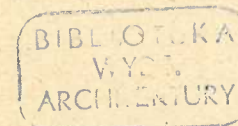
Spółczynnik α podaje tab. 5.

TABELA 5.

I Nr.	α
10	7,33
20	7,75
30	7,63
40	7,52
50	7,41

średnio $\alpha = 7,53$

Wpływ przepon będziemy się starali znaleźć idąc za tokiem myśli prof. Hubera, który wprawdzie badał wpływ żeber w blachownicy, ale tylko dla obciążenia równomiernie rozłożonego. Prof. Huber uważa żebra za podporę sztywną dla stop-



ki, jako belki na sprężystym podłożu. W naszym przypadku siła P spoczywa wprost nad przeponą. Załóżmy, że przepona rozdziela działanie siły równo na obie stopki. Tuż pod stopką górną będą największe naprężenia poprzeczne ściskające, tuż nad stopką dolną będą także naprężenia rozciągające. Przyjmując rozkład naprężeń poprzecznych według prostej, otrzymamy jednostkowe skrócenie, wzgl. wydłużenie wysokości ścianki ponad, wzgl. pod osią obojętną:

$$\frac{2y}{h_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{2\delta \cdot E'}$$

gdzie h_1 oznacza wysokość, δ — grubość ścianki, y — ugięcie stopki, p — nacisk stopki na ściankę, przypadający na jednostkę długości ścianki.

Znamieniem podłoża będzie zatem:

$$k = \frac{p}{y} = 4 \frac{\delta \cdot E}{h_1}$$

Nazwijmy

$$\alpha^4 = \frac{k}{4EI_s} = \frac{\delta}{h_1 I_s}$$

gdzie I_s oznacza moment bezwładności przekroju stopki względem osi poziomej, przechodzącej przez jej środek ciężkości, to ugięcie stopki w odległości x od siły P wynosi:

$$y = \frac{P}{2} \frac{1}{8EI_s \alpha^3} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x).$$

Strzałka ugięcia:

$$f = y_{\max} = \frac{1}{16} \frac{P}{EJ_s \alpha^3} = \frac{P\alpha}{16EI_s \alpha^4} = \frac{P\alpha h_1}{16E\delta}$$

Naprężenie poprzeczne pod siłą:

$$\sigma_z = \frac{kf}{\delta} = \frac{\alpha}{4} \frac{P}{\delta}$$

Dla belek bez przepon, przyjąwszy

$$\alpha_0^4 = \frac{0,4 \delta}{h_1 I_s} = 0,4 \alpha^4,$$

znalazł prof. Huber

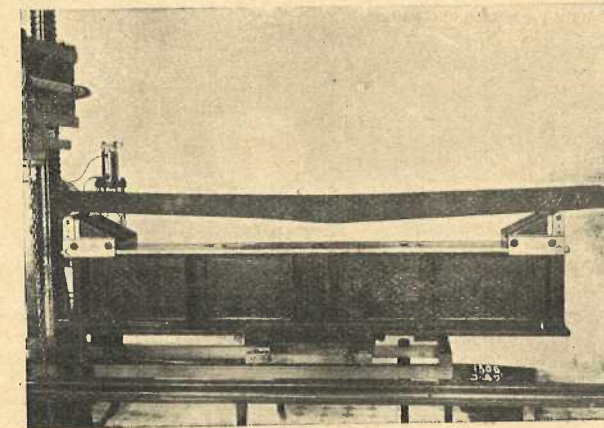
$$\sigma_0 = \frac{P}{2\delta} \alpha_0 = \frac{P}{2\delta} \cdot \sqrt[4]{0,4} \cdot \alpha = 2 \sqrt[4]{0,4} \sigma_z.$$

Zatem:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{2 \sqrt[4]{0,4}} = \frac{\sigma_0}{1,59}.$$

Innymi słowy: jeżeli w miejscu działania siły skupionej usztynimy ściankę przeponą, to naprężenie poprzeczne zmniejszy się 1,59 razy. Wzór (4) przyjmie więc postać:

$$\sigma_z = \frac{x}{1,59} \frac{P}{F} \dots \dots \dots (5)$$



Rys. 17.

TABELA 6.

I Nr.	F cm ²	z	$\frac{F}{z}$ cm ²	$\frac{1,59 F}{z}$ cm ²
16	22,8	7,58	3,01	4,79
20	33,5	7,75	4,32	6,86
24	46,1	7,70	6,00	9,54
30	69,1	7,63	9,05	14,36
32	77,8	7,61	10,2	16,2
34	86,8	7,59	11,4	18,15

Tab. 6 podaje wartości z otrzymane przez interpolację z tab. 5, tudzież wartości pomocnicze dla wzorów (4) i (5) i tab. 7. W tab. 7 zestawiono naprężenia poprzeczne wg wzorów (4) i (5), podstawiając w nich za P odpowiednio Q i R z tab. 1.

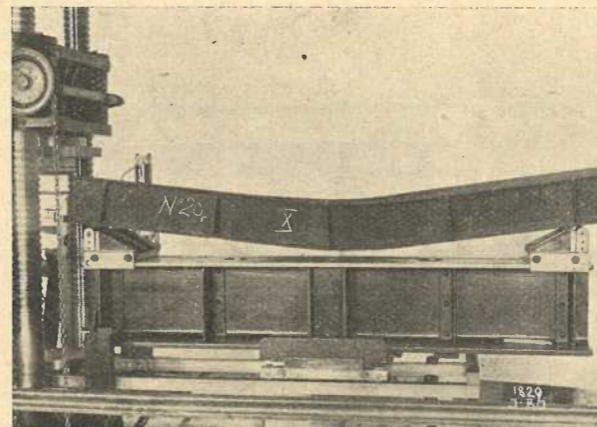
TABELA 7.

I Nr.	ilość przepon	σ_z kg/cm ² w zależności od		
		Q	P_{pl}	R
16	0	22,9		28,7
	3	14,2		15,5
	5	14,2		15,8
20	0	28,9		35,6
	3	17,4		20
	5	19,4		23
24	0	30,8		38,2
	3	20,3		25
	5	22,0		27,6
30	0	33,2		44
	3	26,6		33,7
	5	27,5		33,6
32	0		45	
	3		36,2	
	5		36,7	
34	0		44,8	
	3		38,8	
	5		39,8	

Tab. 7 jest zupełnie analogiczna do tab. 4, która podaje naprężenia podłużne σ dla tych samych przypadków. Ta z pośród wartości σ i σ_z jest podkreślona (*kursywa*) w odpowiedniej tabeli, która jest większa, która zatem była prawdopodobnie powodem zniszczenia. Z porównania obu tabel wynika, że dla belek najniższych, tj. dla I Nr. 16 i 20 niebezpieczniejsze były naprężenia podłużne, dla belek najwyższych, t. j. dla I Nr. 34 — naprężenia poprzeczne. Dla reszty zaś — naprężenia poprzeczne w belkach bez przepon, naprężenia podłużne — w belkach z przeponami.

Wnioski te, wynikające z naszych doświadczeń, zgodne są zupełnie z teorią. Jeżeli bowiem przyjmujemy wraz z prof. Huberem, że o wytrzymałości decyduje w naszym przypadku większe z pośród obu naprężeń σ i σ_z , to aby miarodajne było σ_z , musi być $\sigma_z > \sigma$, czyli dla belek bez przepon wg wzorów (4) i (1):

$$z \frac{P}{F} > \frac{M}{W},$$



Rys. 18.

albo średnio

$$\frac{M}{P} < 2,36 h \dots \dots \dots (6)$$

W naszym przypadku jest wg wzoru (2):

$$\frac{M}{P} = \frac{L}{4}, \dots \dots \dots (7)$$

zatem warunek powyższy wyrazi się nierównością $h:L > 1:(2,36,4)$, czyli

$$h:L > 1:9,44, \dots \dots \dots (8)$$

a że $L=200$ cm, więc $h > 200:0,44 = 21,2$ cm. Rzeczywiście dla $h=20$ cm otrzymalibyśmy:

$$\sigma = 36 \text{ kg/cm}^2, \sigma_z = 35,6 \text{ kg/cm}^2,$$

zatem

$$\sigma > \sigma_z,$$

zaś dla $h=24$ cm:

$$\sigma = 32,4 \text{ kg/cm}^2, \sigma_z = 38,2 \text{ kg/cm}^2,$$

zatem

$$\sigma_z > \sigma.$$

Dla belek z przeponami, uwzględniając wzór (5), nierówność (6) przyjmie postać:

$$\frac{x}{1,59} \frac{P}{F} > \frac{M}{W},$$

czyli

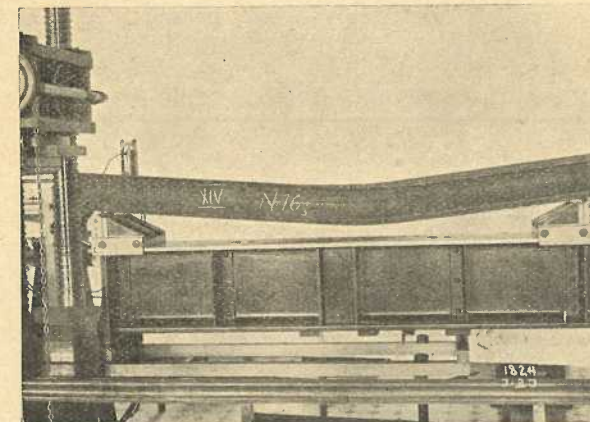
$$\frac{M}{P} < \frac{2,36}{1,59} h,$$

a więc w naszym wypadku

$$h:L > 1,59:9,44 = 1:5,93 \dots \dots \dots (9)$$

Dla $L=200$ cm otrzymujemy $h > 33,8$ cm. Istotnie, dla $h=34$ cm otrzymaliśmy $\sigma_z > \sigma$, zaś dla

$h=32$ cm $\sigma > \sigma_z$. W ten sposób teoria prof. Hubera odnośnie belek bez przepon i podany wyżej przyczynek do niej odnośnie przepon znalazły w doświadczeniach zupełne potwierdzenie.



Rys. 19.

Warto zauważyć, że nierówności (8) i (9) mają przynajmniej w przybliżeniu znacznie ogólniejsze znaczenie, niżby się zdawało. Stosunek bowiem $M:P$ waha się w dość ciasnych granicach i w żadnym praktycznym wypadku nie odbiega wiele od wartości $L:4$. Należy mianowicie zauważyć, że w przypadku większej ilości sił skupionych, względnie w przypadku obciążeń ciągłych, rolę siły P bierze na siebie reakcja, zatem i w skrajnym przypadku obciążenia ciągłego równomiernego mamy:

$$M:P = \frac{1}{8} p L^2 : \frac{1}{2} p L = L:4,$$

jak w równ. (7).

Zastanowić nas jednak muszą zbyt wielkie wartości σ_z w wysokich belkach bez przepon; np. dla I Nr. 35 $\sigma_z = 44,8 \text{ kg/mm}^2$. Jeśli miarą wyężenia dla belek wysokich ma być σ_z , jak nią jest dla belek niskich σ , to wartości te powinny być stałe, gdyż zarówno w jednych, jak i w drugich belkach jesteśmy u kresu wytrzymałości. Jednakże stan zniszczenia powinien być określony tą samą wartością σ_{red} . Wynika stąd, że albo wzór (4) daje wartości za wielkie, albo też $\sigma_{red} < \sigma_z$. Obie ewentualności zachodzą rzeczywiście. Z powodu plastyczności i zmiążdżenia stopki pod walcem obciążającym, matematyczna linja styku walca i stopki zamieniła się na pasek o skończonej szerokości, wynoszącej kilka do kilkunastu cm. Siła obciążająca przestała być siłą skupioną a zaczęła być siłą rozłożoną na powierzchni tego paska. Jeżeli szerokość paska oznaczmy przez c , długość półfali ugięcia przez L , przyczem w przybliżeniu $2L = 0,8h + 2,4 \text{ cm}$, to według prof. Hubera wpływ szerokości c uwzględnić można w dużym przybliżeniu, dzieląc wartość z równ. (4) przez

$$N = 1 + \frac{4}{7} \left(\frac{c}{L} \right)^2.$$

Dla I Nr. 30 (rys. 12) $c = 10 \text{ cm}$, zatem

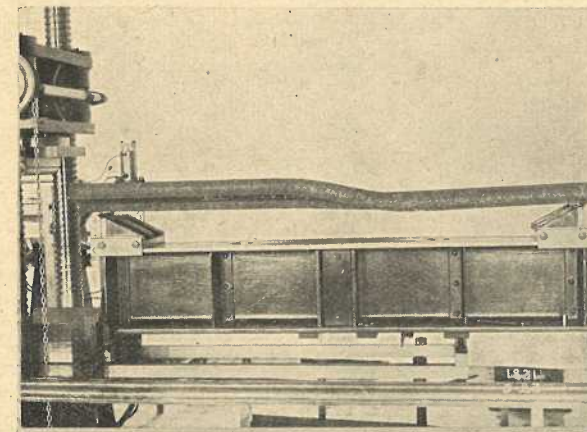
$$\frac{4}{7} \cdot \left(\frac{10}{30} \right)^2 = \frac{4}{7 \cdot 9},$$

ponieważ zaś $N = 1,0635$, więc zamiast 44 będzie $\sigma_z = 44 : N = 41,5 \text{ kg/mm}^2$.

Dalszą redukcję σ_z otrzymamy biorąc pod uwagę siły styczne pomiędzy ścianką a stopką, którą pominięto przy wyprowadzeniu wzorów (4) i (5). Gdyby stopka leżała na ściance, jak na sprzężym podłożu, i gdyby naprężenia stycznych między

stopką a ścianką nie było, to w przypadku równomiernego obciążenia górnej stopki, wielkości q na jednostkę długości, byłoby widoczne naprężenie poprzeczne tuż pod stopką: $\sigma_z = \frac{q}{\delta}$. Zamiast

tego prof. Huber wyznaczył dokładnym sposobem wartość 8–10% mniejszą. W przypadku siły skupionej wpływ naprężeń stycznych zapewne nie jest mniejszy, zatem możemy śmiało wartości wzo-



Rys. 20.

rów (4) i (5) pomnożyć przez 0,91. Nierówności (6)–(9) przez to wiele nie ucierpią, gdyż i wartości σ w tabeli 5 należałoby podzielić przez 1,17 (por. rys. 4a, b i c). W przypadku belki I Nr. 30 będzie więc zamiast 44 kg/mm^2 , $\sigma_z = 0,91 \cdot 41,5 = 37,6 \text{ kg/mm}^2$. Podobnie dla belki I Nr. 34 zamiast $44,8 \text{ kg/mm}^2$ będzie $\frac{0,91}{1,0035} \cdot 44,8 = 38,4$

kg/mm². Mimo wszystko otrzymaliśmy wartość wciąż jeszcze znacznie większą od średniej wartości ok. 30—36 kg/mm², co dowodzi, że w wysokich belkach miara wyężenia $\sigma_{red} < \sigma_z$. Tłumaczyć to można tem, że ściskanie wg. wzoru (4) maleje bardzo prędko z oddaleniem od punktu zaczepienia siły. Wiadomo zaś, że np. w płycie łóżykowej kamiennej lub stalowej, obciążonej tylko na niewielkiej części, naprężenie ścisające miejscowe może osiągnąć bardzo wielkie wartości, większe, niż w przypadku obciążenia całej płyty.

Wnioski.

Ogólne wnioski wypływające z omówionych doświadczeń są następujące:

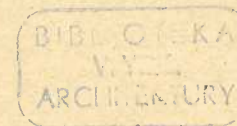
1. Wzmocnienie dźwigarów walcowanych przy pomocy żeber dospojonych w miejscach działania sił skupionych, zwiększa ich wytrzymałość na zginanie. Zwiększenie to zależy od wysokości belek. W badanych wypadkach dochodziło ono do 40% w belkach I Nr. 30, nie było go natomiast w belkach I Nr. 16. Jeżeli żebra umieścić również pomiędzy miejscami działania sił skupionych, to wytrzymałość belek nieco wzrasta, ale w znacznie mniejszym stopniu.

2. W miarę zwiększania wysokości belek walcowanych, wzrasta ich wytrzymałość w mniejszym stopniu, niż ich moment wytrzymałości. Dlatego też największe naprężenia łamiące, obliczone we-

dle wzoru $\sigma = \frac{M}{W}$, są coraz mniejsze w miarę rosnącej wysokości dźwigarów. Wzór ten nie nadaje się właściwie do obliczenia wysokich belek zginanych przez siły skupione, gdyż zniszczenie ich następuje nie przez złamanie, ale przez zmi-

żdzenie. Umieszczenie żeber w miejscach działania sił skupionych usuwa niebezpieczeństwo zmiżdżenia i przywraca wartość powyższego wzoru.

W małych belkach, które ulegają nie miażdżeniu, ale łamaniu znaczenie takich żeber jest dużo mniejsze; w bardzo niskich belkach nie grają żebra absolutnie żadnej roli.



2415