

DOŚWIADCZENIA Z WKŁADKAMI SPECJALNEMI

Prof. inż. dr. St. Bryja i prof. inż. dr. M. T. Huber, Warszawa

Stal rozciągnięta powyżej granicy ciastowatości (plastyczności, płynności) zmienia swoje własności wytrzymałościowe. Mianowicie przy następnych obciążeniach wykazuje inną, znacznie wyższą granicę ciastowatości, a także wyższą wytrzymałość doraźną. Stwierdzono, że najkorzystniejsze jest takie rozciągnięcie, przy którym następuje powiększenie długości pierwotnej o $\pm 6\%$. Z wielu doświadczeń zagranicznych i krajowych wynika, że dla stali zlewnej o granicy ciastowatości, wahającej się od 2200 do 3000 kg/cm², nowa podwyższona granica ciastowatości ma amplitudę wahań znacznie mniejszą i z reguły nie schodzi niżej 3600 kg/cm². Takie rozciągnięcie powoduje więc swojego rodzaju uszlachetnienie i ujednolicenie metalu. Ponadto przy operacji rozciągania wychodzą na jaw wszelkie ukryte skazy materiału macierzystego, co umożliwia dokładniejsze wybrakowanie sztuk wadliwych.

Powyższe własności stali wydłużonej można wykorzystać w ustrojach żelbetowych zginanych, w których, jak wykazują doświadczenia, granica ciastowatości żelaza, względnie naprężenie odpowiadające wydłużeniu $\epsilon = 0,4\%$, odgrywa decydującą rolę. Zginane elementy żelbetowe załamują się bowiem prawie zawsze wskutek wyczerpania nośności uzbrojenia, co następuje przy $\epsilon = 0,4\%$. Stosując zatem stal o wyższej granicy ciastowatości można dopuszczać wyższe naprężenia, nie zmieniając przez to stopnia bezpieczeństwa konstrukcji. Oczywiście sposób wyrobienia stali rozciągniętej musi być taki, aby wydłużona była ona równomiernie na całej swej długości. W praktyce stosuje się dwa rodzaje stali w ten sposób przetworzonej, mianowicie: *stal Isteg* i *siatkę jednolitą*.

A. Stal Isteg

Stal Isteg (fig. 1) wyrabia się z żelaza okrągłego przez śrubowe skręcenie 2 prętów jednakowej średnicy. Skręcenie odbywa się na zimno w specjalnych maszynach. Pręty układają się obok siebie, końce zamocowuje w tarczach o stałej wza-

Stal Isteg wyrabia się z prętów o średnicy 5,5 do 20 mm.

Doświadczenia przeprowadzone w jesieni 1934 r. w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Politechniki Warszawskiej wykazały zgodnie z doświadczeniami zagranicznymi korzystne własności stali Isteg w zastosowaniu do żelbetu. Doświadczenia przeprowadzono na elementach żelbetowych, opisanych na (str. nast.), tablicy 1.

W każdej parze badanych elementów jeden był uzbrojony stalą Isteg (lit. A), drugi żelazem okrągłym (lit. B). Chodziło o porównanie wytrzymałości na zginanie, na ścinanie i na przyczepność stali do betonu w obu rodzajach belek. Uzbrojenie zaprojektowano w ten sposób, że przekrój stali Isteg był o 33% mniejszy od przekroju żelaza okrągłego w odpowiednim elemencie. Samo uzbrojenie zostało również poddane badaniom na rozciąganie celem wyznaczenia granicy plastyczności (ciastowatości), wytrzymałości na rozciąganie i modułu (spółczynnika) sprężystości. W wyniku badań znaleziono następujące średnie wartości:

Tabl. 2

Materiał	Granica plast.	Wytrzymałość	Moduł (spółcz.) sprężystości
A) Stal Isteg 5,5 mm	3738 kg/cm ²	4261 kg/cm	1,630.000
stal Isteg 7 mm	3723 „	4339 „	1,600.000
B) Żelazo okrągłe	2640 „	3630 „	2,101.000

Jak widać z powyższego, stal Isteg wykazała podniesienie granicy plastyczności przeciętnie o $\frac{(3730 - 2640) \cdot 100}{2640} = 41,3\%$ i zwiększenie wytrzymałości o $\frac{4300 - 3630}{3630} \cdot 100 = 18,5\%$.



Fig. 1. Stal Isteg.

jemnej odległości i poddaje skręceniu. Ponieważ końce prętów nie mogą się zbliżyć do siebie, przeto skręcone pręty muszą się odpowiednio rozciągnąć i wydłużyć. Wydłużenie jest tem większe, im mniejszy jest skok spirali. Powierzchnia przekroju pręta złożonego równa się sumie przekrojów prętów składowych. Skok spirali wynosi około 12,5 d_i .

Prób ze stalą Isteg wykonano ogółem 14, granica plastyczności w poszczególnych próbach wahała się od 3600 do 3887 kg/cm² i nie zeszła nigdzie poniżej 3600 kg/cm². Wynik ten jest uderzająco zgodny z doświadczeniami zagranicznymi i lwowskiemi, na zasadzie których zwiększono w szeregu państw europejskich i u nas naprężenia dopu-

szczalne w uzbrojeniu konstrukcyj żelbetowych przy zastosowaniu stali Isteg. Zwiększenie naprężeń przyjęto półtorakrotne, wychodząc ze stosunku granic plastyczności materiałów, mianowicie 3600 kg/cm^2 , jako minimalnej granicy plastycz-

ności stali Isteg, do 2400 kg/cm^2 (według przepisów b. Ministerstwa Robót Publicznych).

Wyniki doświadczeń porównawczych z elementami żelbetowymi uprawniając do następujących wniosków:

I. Wytrzymałość na zginanie

Obciążenia łamiące były w elementach ze stalą Isteg o przekroju mniejszym o 33% prawie dokładnie takie same, jak w odpowiednich elementach z żelazem okrągłym, z niewielkimi odchyleniami w jedną lub drugą stronę o charakterze przypadkowym. Przy niskim procencie uzbrojenia występowały pierwsze rysy, przy słabych uzbrojeniach wcześniej w belkach zbrojonych stalą Isteg niż przy żelazie okrągłym, przy mocniejszych uzbrojeniach natomiast prawie jednocześnie. Ale między rysami przy uzbrojeniu stalą Isteg i okrągłym żelazem jest bardzo duża i zasadnicza różnica. Pierwsze rysy przy żelazie okrągłym, początkowo włoskowate, prawie natychmiast po pojawieniu się przechodzą w szerokie, otwarte szczeliny, gdyż elementy żelaza, przylegające do rys zaczynają się w betonie ślizgać, wskutek czego dalsza współpraca betonu w dużej mierze jest uniemożliwiona. W miarę powiększania obciążenia ślizganie sięga coraz bardziej wгłąb nienaruszonego betonu i szczeliny coraz bardziej się rozwierają.

Pierwsze rysy przy stali Isteg mają inny charakter. Przedewszystkiem są tak drobne, że początkowo trudno je zauważyć bez szkła powiększającego, następnie rozwierają się nawet przy znacznym wzroście obciążeń bardzo powoli, nie tracąc charakteru rys włoskowatych prawie do samego końca. Odształcenie sprężyste elementu żelbetowego dokonywa się przy stali Isteg w ten sposób, że pojawiające się coraz to nowe drobne rysy nadają zespołowi konieczną sprężystość. Przyczyną tego zjawiska jest prawdopodobnie duża przyczepność betonu do stali Isteg. Przyczepność ta nie pozwala prawie zupełnie na ślizganie się prętów i wyeliminowanie betonu z pracy sprężystej w strefie rozciąganej.

Powyżej opisany przebieg zjawisk bardzo wyraźnie daje się śledzić na fotografiach 2 — 9 płyt I. W płycie I-B, uzbrojonej żelazem okrągłym, powstała tylko jedna szczelina i w niej nastąpiło załamanie całego elementu ze zmiażdżeniem betonu. W płycie I-A, uzbrojonej stalą Isteg, praca odkształcenia rozłożyła się na wszystkie odcinki dosyć równomiernie, wskutek czego powstało dużo drobnych rys bez żadnej wyraźnej szczeliny. Wskutek braku poślizgu pręty zostały zerwane, beton pozostał natomiast niezmiądzony.

Z tego można dalej wnioskować, że naprężenie ściskające betonu w stadium załamania przy uzbrojeniu stalą Isteg jest korzystniejsze, gdyż deformacja betonu nastąpić może w wielu punktach dosyć równomiernie. Natomiast przy uzbrojeniu żelazem okrągłym deformacja ta zachodzi tylko w jednym lub kilku przekrojach, a więc dosyć gwałtownie. Już ze względu na tę różnicę przy uzbrojeniu stalą Isteg może być dozwolone wyższe naprężenie dopuszczalne w betonie.

nr elementu	wymiary	Beton Nr	Wykonano	Zbadano	Przebieg, nie na próbie
II-A		2	27/IX	22/XI	przyczepność
II-B		2	27/IX	22/XI	przyczepność
III-A		2	27/IX	24/XI	ściskanie
III-B		2	27/IX	24/XI	ściskanie
III-A		2	27/IX	24/XI	ściskanie
III-B		2	27/IX	24/XI	ściskanie
IV-A		2	27/IX	21/XI	zginanie
IV-B		2	27/IX	21/XI	zginanie
IV-A		2	27/IX	21/XI	zginanie
IV-B		2	27/IX	21/XI	zginanie
I-A		1	18/IX	18/X	zginanie
I-B		1	18/IX	18/X	zginanie

Tabl. 1. Wykaz zbadanych elementów.

II. Ugięcia

Ugięcia elementów zbrojonych stalą Isteg były znacznie (o 60 do 100%) większe od ugięć odpowiednich elementów z żelazem okrągłym. Wynik ten jest zupełnie zrozumiały, gdyż:

ponadto niższy, $E = 1.615.000$, co różnicę wydłużeń jeszcze zwiększa o $\frac{2100000 - 1615000}{1615000} = 30\%$.

Przez superpozycję otrzymujemy $1,5 \cdot 1,3 =$



Fig. 2. Żelazo okrągłe. (I — B).

a) przy tem samym obciążeniu naprężenia w odpowiednio mniejszym przekroju stali Isteg są o 50% wyższe od naprężeń w żelazie okrągłym, co przy równym współczynniku sprężystości wywołałoby automatycznie o 50% większe wydłużenie w stali Isteg;

b) współczynnik sprężystości stali Isteg¹⁾ jest

$= 1,95$, czyli o 90% większe wydłużenie stali Isteg, a zatem i większe ugięcia. Ugięcia jako takie w żelbetnictwie odgrywają tylko podrzędną rolę, gdyż konstrukcje żelbetowe są wogóle bardzo sztywne, tak że nawet przepisy urzędowe nie przewidują żadnych ograniczeń co do strzałek ugięcia przy żelbecie. W wielu wypadkach, np. przy nierównym



Fig. 3. Żelazo okrągłe. (I — B).

¹⁾ Mowa tutaj oczywiście o module wydłużenia sprężystego stali Isteg.

osiadaniu podpór, większa zdolność elementów żelbetowych, uzbrojonych stalą Isteg, do sprężystej pracy będzie niewątpliwie zaletą materiału, nato-

miast w żadnym wypadku nie może przyjąć rozmiarów szkodliwych.

III. Naprężenia rzeczywiste

Przy doświadczeniach z elementami IV i IVa mierzono tensometrami Hugenbergera odkształ-



Fig. 4. Żelazo okrągłe. (I — B).

czenia żelaza i betonu. Z tych odkształceń jednostkowych ϵ obliczono przy pomocy wyznaczonych poprzednio średnich współczynników sprężystości E naprężenia $\sigma = E \cdot \epsilon$. Naprężenia te, które można nazwać zmierzonymi, powinny być bli-

rachunkowe, obliczone dla stadjum I przy $n = 8$, dla stadjum II przy $n = 15$ oraz w alternatywie

$$\text{przy } n = \frac{E_{\text{rzeczywiste}}}{E_b \text{ rzeczywiste}} = n_{\text{rzecz.}}$$

Musimy stwierdzić, że aczkolwiek pomiary odbywały się w stadjum I, to zmierzone naprężenia bliższe są rachunkowo naprężeniom stadjum II. Przy betonie zgodność naprężeń zmierzonych i naprężeń obliczonych przy $n = 15$ jest dosyć dobra, szczególnie jeżeli rozpatrujemy tylko odkształcenia sprężyste; ale i przy odkształceniach całkowitych otrzymujemy dosyć dobrą zgodność naprężeń zmierzonych z naprężeniami rachunkowymi, szcze-

$$\text{gólnie jeżeli wprowadzimy } n = \frac{E_s}{E_b} \text{ rzecz.}$$

Przy uzbrojeniu natomiast jedynie naprężenia zmierzone zapomocą odkształceń całkowitych zbliżają się do naprężeń rachunkowych stadjum II, przyczem przy okrągłym żelazie naprężenia zmierzone są nieco większe, przy stali Isteg nieco mniejsze. Naprężenia zmierzone zapomocą odkształceń tylko sprężystych są natomiast bez wyjątku niższe i to prawie o 50% od naprężeń rachunkowych według stadjum II, ale wyższe i to 2 do 4-krotnie od naprężeń według stadjum I. Naprężenia leżą więc pomiędzy naprężeniami stadjum I i stadjum II. Zjawisko to może być tłumaczone tylko w ten sposób, że n przy rozciąganiu w stadjum I jest kilkakrotnie wyższe niż założone $n = 8$.

Zgodność zmierzonych naprężeń w uzbrojeniu z nieznanymi naprężeniami rzeczywistymi wydaje się być prawdopodobna. Inaczej ma się rzecz z naprężeniami w betonie, a to z kilku względów: 1) przekroje żelbetowe w obszarze zmierzonym pracowały niewątpliwie według stadjum I, a nie stadjum II, a więc przy innych wartościach statycznych; 2) rozkład naprężeń w rzeczywistości daleki jest od rozkładu według Naviera, w tym sensie, że naprężenia na samej krawędzi są mniejsze,

Tabl. 3 Porównanie naprężeń rachunkowych i rzeczywistych

belka	uzbrojenie	σ_b zmierz.		σ_s zmierz.		σ_b obliczone			σ_s obliczone		
		$E_{catk.}$	$E_{spr.}$	$E_{catk.}$	$E_{spr.}$	St. I	St. II		St. I	st. II	
							$n=15$	$n_{rzecz.}$		$n=15$	$n_{rzecz.}$
IV B	żel. okr.	30,1	26,8	903	420	21,4	31,9	37,9	105	785	772
IV A	Ist.	49,2	35,2	536	363	24,6	34,9	45,3	120	772	748
IVaB	żel. okr.	24,3	21,8	307	202	19,3	22,1	24,9	82	258	249
IVaA	Ist.	29,7	23,6	377	194	19,7	24,5	30,8	90	380	360

skie rzeczywistych. W powyższej tabelce zestawiono przyrosty naprężeń rzeczywistych, obliczone raz z odkształceń całkowitych, a raz z samych odkształceń sprężystych przy wzroście obciążenia o 500 kg, a obok podano odpowiednie naprężenia

a bliżej osi obojętnej większe od naprężeń według rozkładu trójkątnego.

Stąd wniosek, że rzeczywiste naprężenia winny być mniejsze niż wynika z pomiarów i powyższych obliczeń, czyli że E_b winno być mniejsze,

niż przy osiowym ściskaniu. Zagraniczni badacze podają istotnie dla betonu przy zginaniu

$$E_{gin.} = \frac{2}{3} \text{ do } \frac{1}{2} E_{osio.}$$

Względna zgodność naprężeń zmierzonych z naprężeniem według stadium II w naszym wypadku jest zatem tylko przypadkowa.

IV. Spółczynnik „ n ”

Wyniki doświadczeń nie wskazują na konieczność przyjęcia przy uzbrojeniu stałą Isteg innego n , niż zwykle $n = 15$. Rachunkowe naprężenia w

uzbrojeniu są prawie niezależne od takiej, czy innej wartości liczbowej n . Co się zaś tyczy naprężeń w betonie, to należy zaznaczyć, że jak wykazały rozmaite doświadczenia (np. prof. Paszkowskiego), wartość liczby n zmienia się nawet przy tym samym betonie, zależnie od naprężeń i jest inna np. dla samych naprężeń i inna dla ugięć. Nowa wartość dla n ani przy stali Isteg, ani przy okrągłym żelazie nie poprawiłaby w niczem stopnia dokładności rachunku statycznego, tem bardziej, że same wzory dla żelbetu oparte są na szeregu dość dowolnych założeń.

V. Przyczepność

Porównyując ze sobą te momenty, w których nastąpiło przesunięcie wystającego końca prętów o 0,04 mm znajdujemy, że stal Isteg wykazała przy przekroju mniejszym o 33% przyczepność o przeszło 20% większą od przyczepności żelaza okrągłego. Ponadto dalsze ślizganie pręta przy powiększaniu obciążenia aż do załamania belek wzrastało dla stali Isteg bez porównania wolniej, niż dla żelaza okrągłego, co świadczy o tem, że w chwili załamania, przy jednakowym, a nawet nieco większym obciążeniu łamiącym, przyczepność stali Isteg w przeciwieństwie do żelaza okrągłego nie była jeszcze wyczerpana. Dlatego haki mogą być tu odpowiednio mniejsze.

VI. Ścinanie

Przy doświadczeniach z belkami III i IIIa wytrzymałość betonu została przewyciężona niewątpliwie przez działanie ścinające, gdyż beton zarysował się najpierw w punktach podparcia belek (p. fig. 10 — 11), a nie w miejscu największego momentu w środku, lub w osłabionym przekroju pod siłą skupioną. Przekrój pod siłą skupioną był najsłabszym punktem każdej belki, jeżeli chodzi o zginanie, gdyż przekrój żelaza pracujący na moment, był tam przez odgięcie części żelaza wydat-



Fig. 5. Żelazo okrągłe. (I — B).



Fig. 6. Stal Isteg. (I — A).

nie osłabiony, podczas gdy moment posiadał tam jeszcze swą największą wartość.

Napężenie w betonie obliczano według fazy I (τ_o) i przy fazie II (τ_b), a w żelazie przy uwzględnieniu tylko prętów odgiętych (σ_{zo}) i przy uwzględnieniu wszystkich prętów (τ_s). W momencie pojawiania się pierwszych rys wypadały wartości naprężeń w kg/cm² podane w tabl. 4.

Jak widać z powyższego zestawienia rysy wskutek ścinania powstawały przy stali Isteg i żelazie okrągłym przy tych samych praktycznie naprężeniach w stadjum I i II. Niższe dla belek III a (teowych) wartości τ_o i wyższe wartości τ_b świad-

Tabl. 4 Naprężenia ścinające

Belka	Uzbrojenie	τ_o	τ_b	σ_{zo}	τ_s
III B	żelazo	21,0	30,8	4780	1970
III aB	okrągłe	18,7	37,6	2930	1604
III A	stal	21,2	29,7	7260	3010
III aA	Isteg	18,1	34,9	4675	2450



Fig. 7. Stal Isteg. (I — A).

czą o tem, że w przekrojach teowych istnieje pewne współdziałanie „płyty” na ścięcie. Dla nośności belki miarodajny jest przekrój pośredni między teowym i czworobocznym.

Bardzo trudno jest ocenić pracę żelaz odgiętych. Rachunek zapomocą przyjętej w praktyce metody, według której przy braku strzemion sa-

mo odgięte żelazo przyjmuje całkowitą siłę ścinającą, czyli $\sigma_{zo} = \frac{Q}{F_{odg.} \sqrt{2}}$ dał w naszym wypadku

rezultaty absurdałne, bo naprężenia przekraczające dwukrotnie rachunkową wytrzymałość materiału. Stąd wniosek, że współpraca żelaz, przepu-

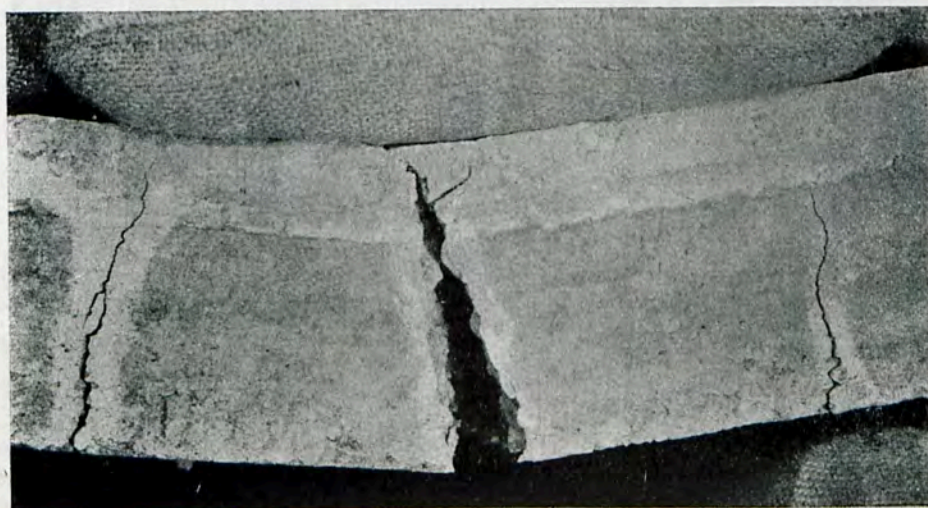


Fig. 8. Stal Isteg. (I — A).

szczonych u dołu prosto, musiała być bardzo znaczna dzięki ich dobremu zakotwieniu poza podpórnikami.

Istotnie obliczając naprężenia w żelazie z uwzględnieniem żelaz prostych $\tau_s = \frac{Q}{F_{pr} + F_{odg.} \sqrt{2}}$ dochodzimy do prawdopodobnych cyfr naprężen-

zniszczenia belek, wynika że i w tym wypadku nośność stali Isteg jest $1\frac{1}{2}$ -krotnie większa od nośności prętów okrągłych.

B. Siatka jednolita

Siatkę jednolitą (fig. 12) wyrabia się z wyznaczonych blach na specjalnych maszynach w ten

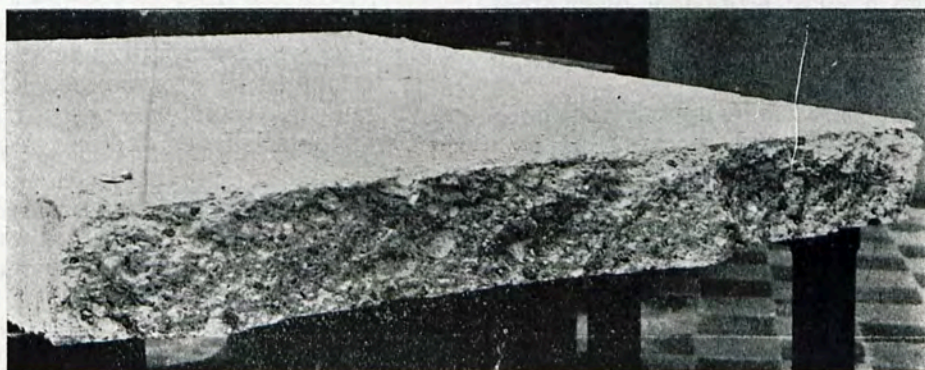


Fig. 9. Stal Isteg. (I — A).

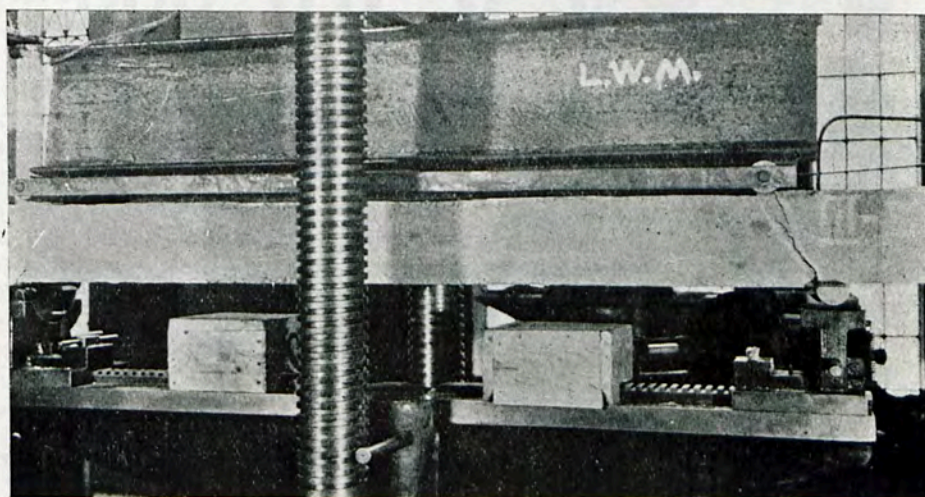


Fig. 10. Żelazo okrągłe. (III — B).

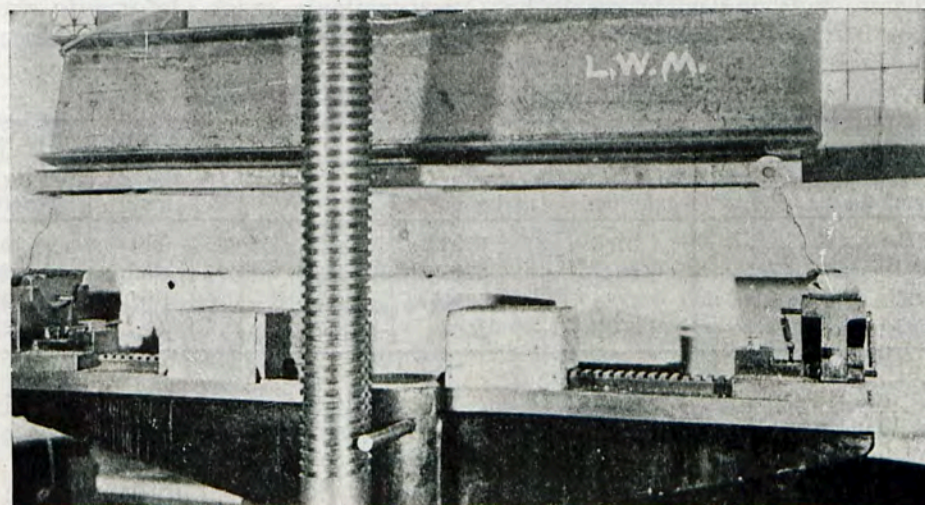


Fig. 11. Stal Isteg. (III — B).

wych, odpowiadających prawie dokładnie naprężeniom od zginania. Z porównania naprężeń τ_s , obliczonych w chwili

sposób, że maszyna najpierw nacina poziomym ruchem jeden rząd pasków, a następnie ruchem pionowym ten rząd pasków wygina prostopadle do

powierzchni blachy, leżącej poziomo, przyczem paski, a zatem cała blacha są wydłużone. Jako produkt fabrykacji otrzymuje się siatkę o oczkach romboidalnych, w której paski stoją bokiem prawie prostopadle do powierzchni blachy. Mniejszy kąt każdego rombu wynosi ok. 41° ; taki kąt został doświadczalnie ustalony jako dający najlepszy efekt. Wydłużenie każdego paska wynosi tyle, ile odpowiada obróceniu go o $20,5^\circ$ względem pierwotnej

pozycji, czyli $\frac{l}{\cos 20,5^\circ} - l = 0,77 = 7\%$, która to wartość odpowiada prawie zupełnie średniemu wydłużeniu stali Isteg, wynoszącemu ok. 6% .

Powyższe rezultaty zgadzają się z wynikami uzyskanymi zagranicą i wskazują, że granica ciastowatości siatki jednolitej może bardzo znacznie przekroczyć 3600 kg/cm^2 i że najlepsze wyniki osiągane są przy blachach miękkich o większej wydłużalności „ ϵ ”. Elementy żelbetowe uzbrojone siatką jednolitą wykonywane są w praktyce od dziesiątek lat. Współpraca siatki jednolitej z betonem jest zupełnie analogiczna jak u stali Isteg. Ugięcia są większe niż przy żelazie okrągłym A35. rysy natomiast są drobniejsze, liczniejsze i więcej równomierne, wskutek czego równomierniejszy jest wysiłek ściskanego betonu. Większa przyczep-

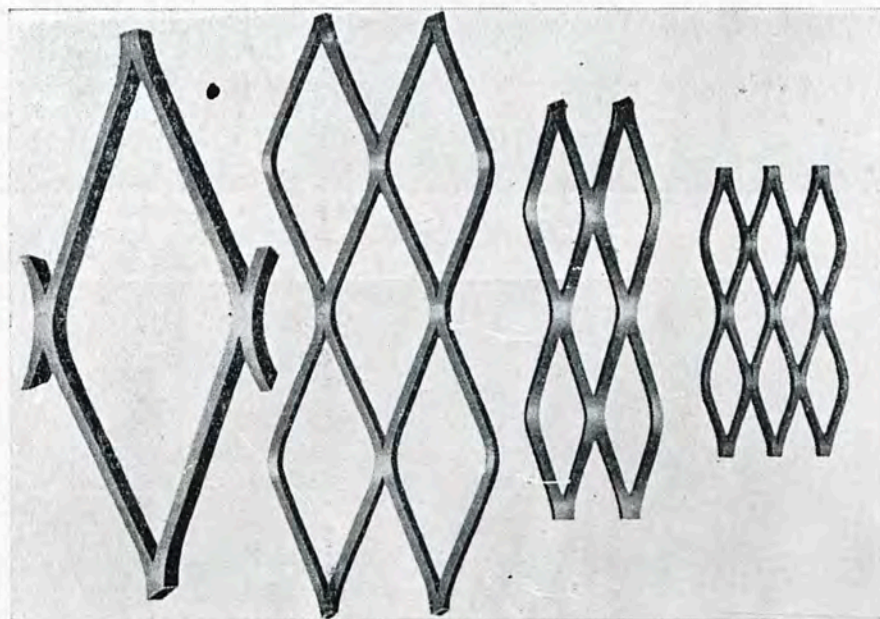


Fig. 12. Siatka jednolita.

Siatkę jednolitą wyrabia się z blach o grubości 0,5 do 4,5 mm, przy szerokości pasków 2,5 do 10 mm i wielkości rombów 10/42, 20/62, 40/115, 75/200 i 150/400 mm. Siatka jednolita jest w użyciu od przeszło 40 lat i była już wielokrotnie badana laboratoryjnie.

ność, uzyskana przy stali Isteg przez specyficzny kształt pręta, u siatki jednolitej wywołana jest przez liczne węzły, z których każdy działa jako oddzielny hak. Siatka jednolita, rozciągana bez usztywnienia oczek, deformuje się bardzo; w żelbecie taka deformacja jest wykluczona, gdyż oczka

Tabl. 5. Badanie siatek jednolitych

B l a c h a			S i a t k a j e d n o l i t a			Procentowa zmiana wskutek przeróbki		
R_{pl} kg/cm ²	R_w kg/cm ²	ϵ %	R_{pl} kg/cm ²	R_w kg/cm ²	ϵ %	R_{pl} kg/cm ²	R_w kg/cm ²	ϵ %
2848	3375	22,1	3736	3993	11	+ 30,1	+ 18,1	— 50,3
3042	4205	26,2	4544	4715	10,9	+ 49,2	+ 12,2	— 58,4
3129	4204	23,9	4728	5001	12,1	+ 51,1	+ 18,8	— 49,4
3234	3787	23	4607	4667	7,7	+ 42,4	+ 23,3	— 66,5

Doświadczenia przeprowadzone w jesieni 1934 r. w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Politechniki Warszawskiej miały na celu stwierdzić, o ile przy różnych gatunkach blach podnosi się granica ciastowatości przy przeróbce blachy na siatkę jednolitą. Wyniki tych doświadczeń zestawione są w następującej tabl. 5.

usztywnione są przez sam beton. By usztywnienie to było istotnie skuteczne, zaleca się nie stosować siatek o zbyt małych oczkach (np. 10/42 i 20/62). Wnioski wyciągnięte dla stali Isteg są całkowicie ważne również dla siatki jednolitej.