



Badania zakotwień strzemion wykonanych ze stali o wysokiej ciągliwości

Autorzy
Radosław Kupczyk
Włodzimierz Starosolski

Opracowanie
Centrum Promocji Jakości Stali

Badania zakotwień strzemion wykonanych ze stali EPSTAL o wysokiej ciągliwości

Autorzy:

Radosław Kupczyk

Włodzimierz Starosolski

Politechnika Śląska

Opracowanie:

Centrum Promocji Jakości Stali

Witamy w CPJS



Centrum Promocji Jakości Stali – CPJS – jest organizacją, której celem jest zapewnienie wysokiej jakości wyrobów stalowych oferowanych przez krajowych producentów oraz promocja nowych rozwiązań technicznych i materiałowych.

Działalność CPJS to:

- **Certyfikacja** wyrobów stalowych oraz nadzór techniczny nad produkcją i właściwościami certyfikowanych produktów.
- **Inicjowanie** i współrealizowanie projektów badawczych ukierunkowanych na poprawę jakości wyrobów stalowych oraz bezpieczeństwo konstrukcji inżynierskich.
- **Wspieranie** współpracy grup badawczych z przemysłem.
- **Przekazywanie** informacji na temat wyrobów stalowych wysokiej jakości.
- **Organizowanie** oraz współorganizowanie spotkań szkoleniowych, seminariów, warsztatów.
- **Tworzenie** pomostu pomiędzy użytkownikami wyrobów stalowych i ich producentami.
- **Monitorowanie** i czynny udział w działaniach normalizacyjnych i certyfikacyjnych na poziomie instytucji krajowych i europejskich.

www.cpjs.pl

Centrum Promocji Jakości Stali
Ul. Koszykowa 54
00-675 Warszawa
Tel. +48 22 630 83 75
Fax +48 22 625 50 49
E-mail: biuro@cpjs.pl

Stal zbrojeniowa o wysokiej ciągliwości ze znakiem EPSTAL



EPSTAL jest znakiem jakości nadawanym przez CPJS na wyroby ze stali gorącowalcowanej o podwyższonej ciągliwości, przeznaczone do zbrojenia betonu (gatunek B500SP).

Najważniejsze zalety stali EPSTAL to:

- **Wysoka ciągliwość.** Stal EPSTAL spełnia wymagania klasy C wg Eurokodu 2 – najwyższej klasy ciągliwości. Stosowanie stali o wysokiej ciągliwości zwiększa bezpieczeństwo konstrukcji żelbetowych – w sytuacji wystąpienia zbyt wysokich naprężeń nie ulegają one kruchemu zniszczeniu.
- **Odporność na obciążenia dynamiczne** zmęczeniowe [zmienne naprężenia rozciągające], cykliczne [naprzemienne ściskanie i rozciąganie] oraz wielokrotnie zmienne.
- **Łatwa identyfikowalność** poprzez napis EPSTAL nawalcowany na każdym pręcie oraz indywidualny układ żeber.
- **Pełna spawalność** – spawalność i zgrzewalność – potwierdzona w badaniach laboratoryjnych wykonanych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach.
- **Dodatkowa kontrola procesu produkcji.** CPJS wykonuje kwartalną analizę statystyczną wyników zakładowej kontroli produkcji.
- **Program badawczy.** Wykonanych zostało wiele innowacyjnych badań naukowych, mających na celu rozpoznanie zachowania się elementów konstrukcji zbrojonych stalą EPSTAL w porównaniu do zachowania się takich samych elementów zbrojonych stalą kruchą.
- **Dodatkowa polisa ubezpieczeniowa.**

Parametry stali EPSTAL – str. 88 ÷ 89
Więcej na www.cpjs.pl

Wstęp	6
Modele badawcze	10
Stanowisko i przebieg badania	20
Materiały	26
Wyniki badań	32
Analiza wybranych wyników badań	48
Badanie belek żelbetowych na ścinanie	80
Podsumowanie Piśmiennictwo	84

Spis treści

Wstęp

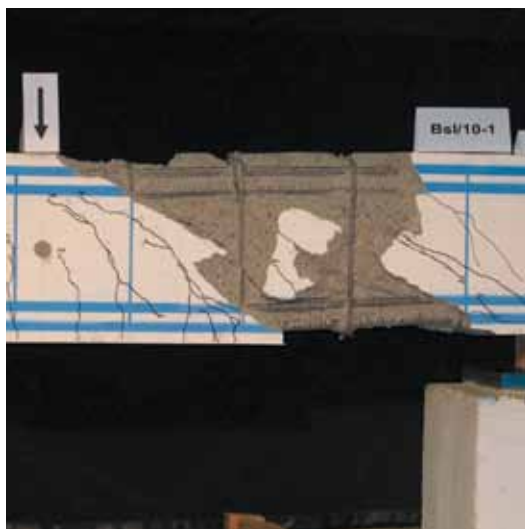
Na przełomie 2006/2007 roku na zlecenie Centrum Promocji Jakości Stali w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej w Gliwicach przeprowadzono badania [1] zachowania się czterech jednoprzęsłowych belek żelbetowych, zbrojonych poprzecznie strzemionami ze stali klasy B (St3SY-b-500) i C (B500SP – EPSTAL®) wg EC2 [2]. Zbrojenie to zaprojektowano zgodnie z wymogami normowymi EC2 [2] i PN [3]. W stadium dużego wyężenia elementów doszło do otwierania się prostych haków strzemion, co skutkowało utratą ich nośności - rys. 1. Powyższy obraz zniszczenia odbiega od powszechnie przyjmowanego i wskazuje na brak możliwości wykorzystania w stadium przeciążenia rezerwy nośności tkwiącej w stali.

W niniejszych nowych badaniach, również zleconych przez Centrum Promocji Jakości Stali, prowadzonych w latach 2008 i 2009, podjęto próbę odpowiedzi na pytanie: w jakich sytuacjach i przy spełnieniu jakich wymagań konstrukcyjnych zapewnione jest w pełni wykorzystanie dobrych właściwości stali o wytrzymałości charakterystycznej $f_{yk} \geq 500$ MPa i doprowadzenie do zerwania strzemion?

Zasadniczą uwagę skupiono na wpływie kształtu haka pręta, grubości otuliny, wytrzymałości betonu, zastosowania zbrojenia podłużnego, jak również działania dużych naprężeń ściskających ($\sigma_{cp} \approx 75 \div 85 \% f_{c,cube}$) prostopadłych do płaszczyzny zagięcia pręta, na uzyskiwane nośności zakotwień zbrojenia poprzecznego.

Rys. 1

Otwarte haki proste 90° strzemion.



Zakres badań ograniczono do kotwienia, w strefach nie poddanych rozciąganiu, strzemion o średnicach: 8, 10 i 12 mm (przy czym pręty dwóch największych średnic wykonano ze stali EPSTAL). Wyniki badań podano w formie szczegółowego raportu, nie odnosząc się z tego względu do badań obcych ani rozważań teoretycznych.

Początkowo założono wykonanie doświadczenia na 40 modelach drobnowymiarowych, lecz w miarę postępu prac okazało się, iż liczba ta musi ulec wielokrotnemu zwiększeniu, osiągając końcową liczebność 172-ch elementów. Powodem tego stanu rzeczy były zjawiska i efekty zaobserwowane w trakcie prowadzenia badań rozpoznawczych na 5-ciu seriach wstępnych. Część rozpoznawcza charakteryzowała się dopracowaniem końcowego kształtu modeli badawczych, przyjmowaniem lub pomijaniem zbrojenia podłużnego, sprawdzaniem sposobu obciążania modeli (zarówno wyrywania strzemienia jak również osiowego obciążania elementów w prasie) itp.. Przyjęto prowadzić badania elementów po 6-ciu dniach dojrzewania betonu. Założenie to wynikało z konieczności uwzględnienia w projektowaniu nowych modeli wyników otrzymanych na podstawie elementów już zbadanych, w celu możliwie szybkiego uzyskania rozwiązania konstrukcyjnego zapewniającego skuteczne zakotwienie zbrojenia. Końcowy pozytywny wynik zaplanowano zweryfikować wykonując badania na elementach 28-mio dniowych. Początkowo wykonano modele, w których strzemiona kotwiono wg rozwiązań norm EC2 [2] i PN [3], tj. haka prostego 90° i ostrego 135°. W miarę postępu prac okazało się, iż te propozycje nie dają wyników przez nas oczekiwanych, w związku z czym badania poszerzono o nowe rozwiązanie tzw. "haka poza normowego".

Modele badawcze

Zaprojektowane modele badawcze imitowały fragment elementu konstrukcyjnego (belki, słupa), obejmującego strefę krawędziowego zakotwienia strzemienia. Etapy prowadzące do ostatecznego przyjęcia kształtu elementu badawczego przedstawiono na rys. 2. Modele charakteryzowały się zbliżonym kształtem w postaci odwróconej litery T (o wymiarach gabarytowych maksymalnych 300×300×300 mm), gdzie konstrukcja wsporników wynikała z oparcia urządzenia wyrywającego pręt strzemienia, natomiast skosy, z potrzeby odpowietrzenia mieszanki betonowej, której układanie odbywało się od góry, od strony haka.

Wrywanie pręta odbywało się na jeden z dwóch sposobów, tj. przy nacisku pionowym na element w prasie hydraulicznej (prostopadłym do płaszczyzny zagięć haka zbrojenia poprzecznego), lub bez niego. Sam mechanizm wyciągania pręta strzemienia we wszystkich modelach był identyczny. Zróżnicowano natomiast wytrzymałość betonu, grubość otuliny, średnicę pręta strzemienia, liczbę prętów zbrojenia podłużnego, kształt haka oraz średnicę zagięć strzemion, jak również wartość naprężeń ściskających wywołanych w prasie.

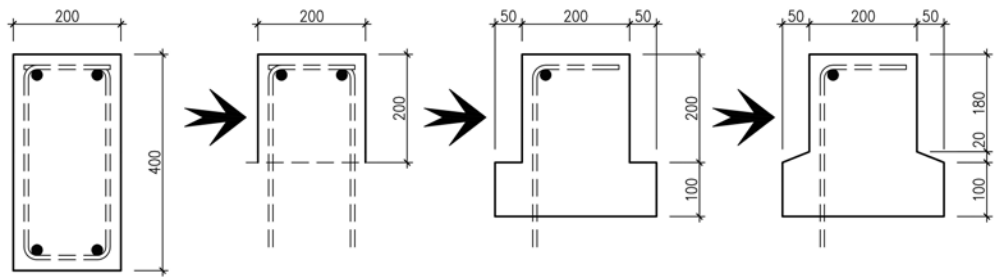
W każdym elemencie badawczym zastosowano zbrojenie poprzeczne w postaci strzemienia o średnicy 8, 10 lub 12 mm, umieszczonego w płaszczyźnie poziomej w połowie wysokości elementu, wg rys. 3 i zakotwionego hakiem normowym (rys. 4a, b) i poza normowym (rys. 4 c) przy krawędzi elementu.

W wybranych modelach zastosowano zbrojenie podłużne w postaci prętów prostych o średnicy 8, 10, 12 lub 16 mm – rys. 5a . Najczęściej stosowano jednakową średnicę na zbrojenie poprzeczne i podłużne. W elementach poddanych ściskaniu w prasie siłą prostopadłą do płaszczyzny haka strzemienia zbrojenie podłużne ucinano na równi z krawędzią modeli – rys. 5b, natomiast w elementach badawczych nie obciążonych w prasie końce prętów gwintowano i kotwiono na czołach elementu za pomocą nakręconych nań nakrętek na podkładkach – rys. 5c.

W elementach ściskanych w prasie stosowano dodatkowe zbrojenie, tzw. „spinki”, o średnicy 8 mm, w kształcie litery „n”, w liczbie 2 szt. na model – rys. 6. Zgodnie z wymogiem normy [3] miały one na celu przytrzymanie ściskanego zbrojenia podłużnego, zabezpieczając je tym samym przed możliwym wyboczeniem.

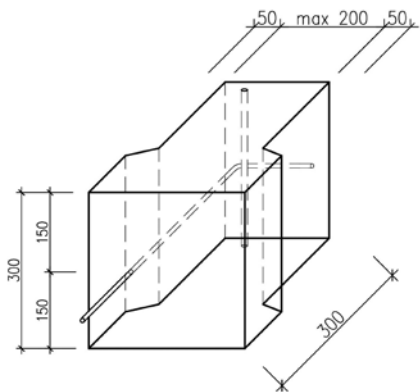
Rys. 2.

Schemat opracowania podstawowego przekroju poprzecznego modelu badawczego.



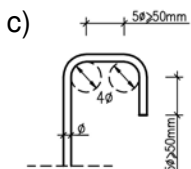
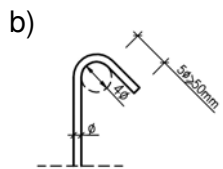
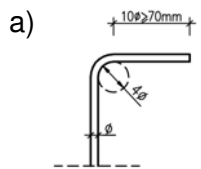
Rys. 3.

Przykładowy element badawczy z naniesionymi maksymalnymi wymiarami zewnętrznymi.



Rys. 4.

a) hak prosty 90°, b) hak ostry 135°, c) rozwiązanie poza normowe.



Rys. 5.

Sposoby kotwienia zbrojenia podłużnego:

- a) widok prętów w formie przed betonowaniem,
- b) ścięte pręty na równi z płaszczyzną elementu,
- c) nagwintowane pręty i nakręcone nań nakrętki na zaprawie cementowej.

a)



b)



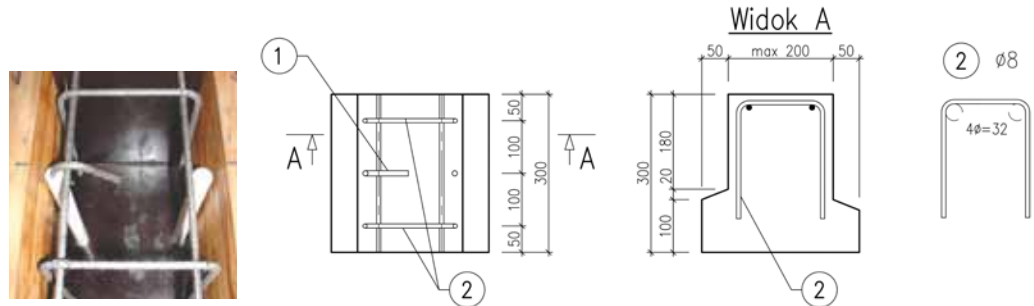
c)



Rys. 6.

Położenie zbrojenia przytrzymującego pręty podłużne w elemencie ściskanym:

1 - strzemię, 2 - „spinki”.

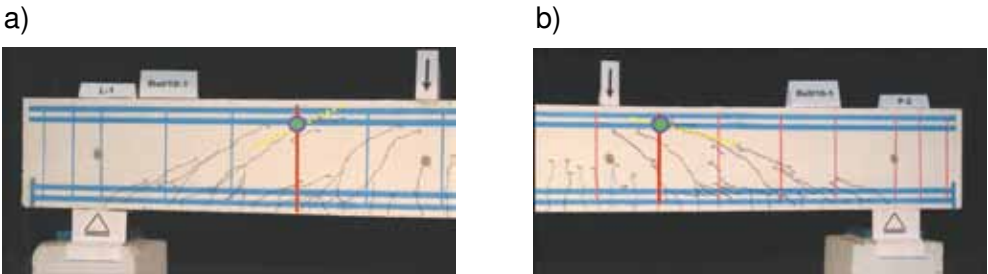


Na podstawie obrazu zarysowań belek żelbetowych w trakcie badań [1] – rys. 7, przyjęto ograniczoną długość przyczepności strzemion do betonu poprzez umieszczenie pręta w rurce PCV o średnicy 22 mm – rys. 8. Przyjęty przebieg rys ukośnych ma miejsce w stadium niszczenia, czyli w czasie, gdy naprężenia w stali strzemion są na tyle duże, że dochodzi do jej uplastycznienia.

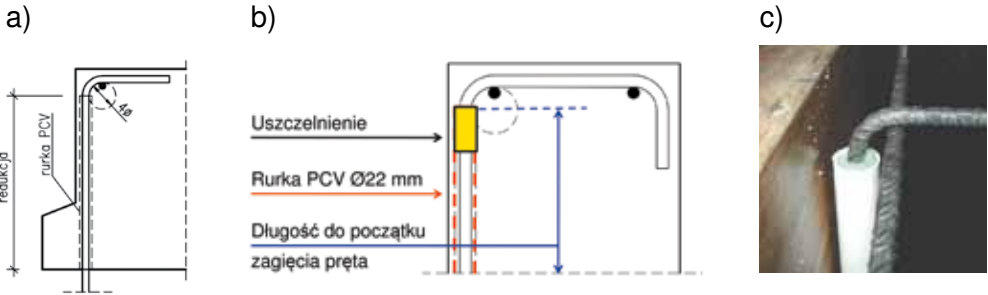
W badanych elementach przyjęto niskie wartości otulin c_{min} , zgodne z normą [3], wynoszące 10, 15 i 20 mm dla strzemion o średnicy 8 i 10 mm oraz 15 i 20 mm dla prętów o średnicy 12 mm – rys. 9. Odchyłka wykonawcza $\Delta c \approx 0$ mm.

Gięcie zbrojenia modeli, tj. strzemion i „spinek”, wykonano na minimalnej dopuszczalnej średnicy zgodnej z [2, 3] i wynoszącej 4 x średnica pręta – tablica 1. Wyjątek stanowiła seria zasadnicza IV, gdzie zastosowano średnicę gięcia prętów wynoszącą 8 x średnica pręta.

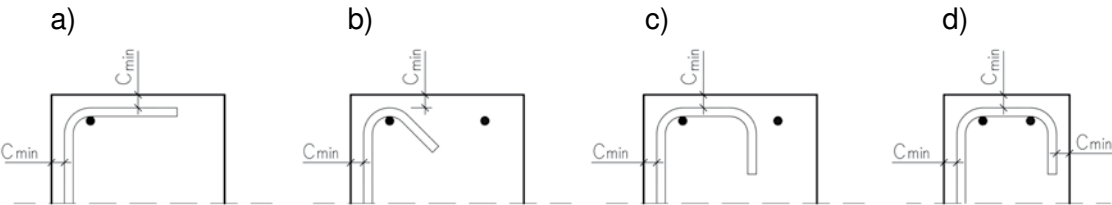
Rys. 7.
Strefa przypodporowa belek żelbetowych w trakcie badań [1] z zaznaczonym strzemiem i punktem jego przecięcia przez rysę ukośną: a) Bsl/10-1, b) BslI/10-1.



Rys. 8.
Przyjęty odcinek zakotwienia:
a) i b) odcinek redukcji przyczepności pręta do betonu, c) pręt w rurce PCV.



Rys. 9.
Przyjmowana grubość otuliny w wypadku podstawowych kształtów haków strzemion a) ÷ d) i szerokości przekroju modeli.



Tablica 1
Przyjęte minimalne średnice gięcia prętów.

Średnica pręta	Minimalna średnica zagięcia
8 mm	4x8 = 32 mm
10 mm	4x10 = 40 mm
12 mm	4x12 = 48 mm

Zastosowano poniższy sposób oznaczenia każdego modelu, umożliwiając tym samym jednoznaczną ich identyfikację. Na skład oznaczenia przyjęto:

SI-P10-010-15-1 /C/N (P10-10)

↓ Nazwa Serii ↓ Typ haka strzemienia oraz jego średnica ↓ Grubość otuliny ↓ Numer Serii ↓ Dodatkowe informacje ↓ Rodzaj pręta podłużnego, ich ilość i średnica

↓ Dodatkowe oznaczenie stosowane przy haku poza normowym

Nazwa Serii:

- SI** - seria Zasadnicza (dotyczyła elementów badanych po 6 dniach dojrzewania betonu),
- SII** - seria Uzupełniająca (dotyczyła elementów badanych po około 28 dniach dojrzewania betonu).

Typ haka strzemienia oraz jego średnica:

- P** - hak prosty 90° wg rys. 4a,
- S** - hak ostry 135° wg rys. 4b,
- W** - hak poza normowy wg rys. 4c,
- WD** - hak poza normowy o kształcie analogicznym jak na rys. 4c, lecz o znacznej długości prostego odcinka pręta między zagięciami, wynikającego z przyjętej szerokości elementu,
- 8** - strzemię o średnicy 8 mm,
- 10** - strzemię o średnicy 10 mm,
- 12** - strzemię o średnicy 12 mm.

Grubość otuliny c_{min} :

- 010** - 10 mm
- 015** - 15 mm
- 020** - 20 mm

Numer serii: 1 ÷ 20

Dodatkowe oznaczenie stosowane przy haku poza normowym:

- 1** - koniec haka strzemienia zakotwiony jest jak w typowych belkach żelbetowych wewnątrz przekroju elementu badawczego (wg rys. 9c),
- 2** - koniec strzemienia posiada otulinę grubości: $c_{min} + \varnothing$, gdzie $\varnothing$ – średnica zastosowanego pręta podłużnego,
- brak oznaczenia** - koniec pręta strzemienia otulony jest minimalną grubością betonu (wg rys. 9d).

Dodatkowe informacje:

- /C** - modele, w których zastosowano beton o podwyższonej „kostkowej” wytrzymałości na ściskanie wynoszącej $f_{c,cube} \approx 26 \div 31$ MPa,
- /CM** - modele, w których zastosowano beton o wysokiej „kostkowej” wytrzymałości na ściskanie wynoszącej $f_{c,cube} \approx 36 \div 38$ MPa,
- /CS** - modele, w których zastosowano beton o niskiej „kostkowej” wytrzymałości na ściskanie wynoszącej $f_{c,cube} \approx 14 \div 18$ MPa,
- /N** - model badany przy udziale prasy hydraulicznej dającej nacisk wynoszący 75 ÷ 85 % wytrzymałości kostkowej danego betonu na ściskanie,
- /NS** - model badany przy udziale prasy hydraulicznej i nacisku wynoszącym ≈ 100 kN,
- /F** - modele, w których zastosowano strzemiona o większym promieniu zagięcia niż standardowo wynoszącym 8 $\varnothing$.

Modele bez oznaczeń dodatkowych posiadają standardową średnicę zagięć strzemion wynoszącą 4 $\varnothing$ oraz charakteryzują się betonem o wytrzymałości kostkowej na ściskanie $f_{c,cube} \approx 21 \div 25$ MPa.

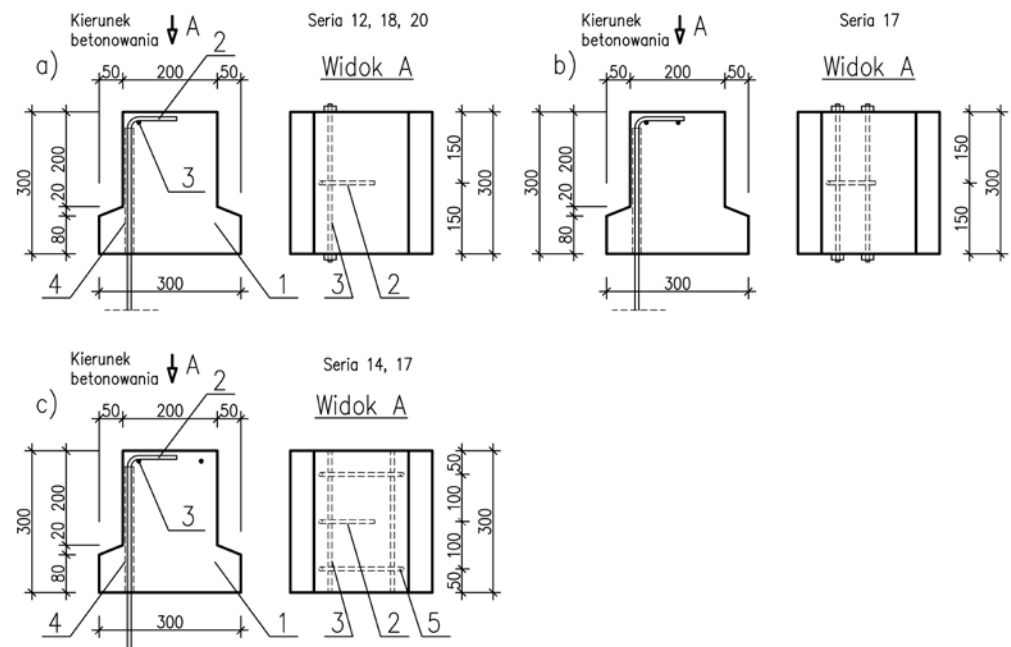
Rodzaj pręta podłużnego, ich ilość i średnica:

- B** - nie zastosowano zbrojenia podłużnego,
- P** - zastosowano zbrojenie podłużne z prętów stalowych,
- 8** - zastosowano jeden pręt podłużny o średnicy 8 mm, znajdujący się wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia,
- 10** - zastosowano jeden pręt podłużny o średnicy 10 mm, znajdujący się wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia,
- 12** - zastosowano jeden pręt podłużny o średnicy 12 mm, znajdujący się wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia,
- 8-8** - zastosowano dwa pręty podłużne o średnicy 8 mm,
- 10-10** - zastosowano dwa pręty podłużne o średnicy 10 mm,
- 12-12** - zastosowano dwa pręty podłużne o średnicy 12 mm,
- 16-12** - zastosowano dwa pręty podłużne w przekroju: jeden o średnicy 16 mm wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia, oraz drugi o średnicy 12 mm wewnątrz drugiego zagięcia pręta.

Rysunki konstrukcyjne modeli badawczych Serii Zasadniczej i Uzupełniającej przedstawiono na rys. 10 ÷ 12 w podziale na rozwiązania kotwienia haka strzemienia.

Rys. 10.

Modele zbrojone strzemieniem zakończonym hakiem prostym 90° wg rys. 4a:
1 – blok betonowy, 2 – strzemię, 3 – pręt podłużny, 4 – rurka PCV, 5 – „spinki”.

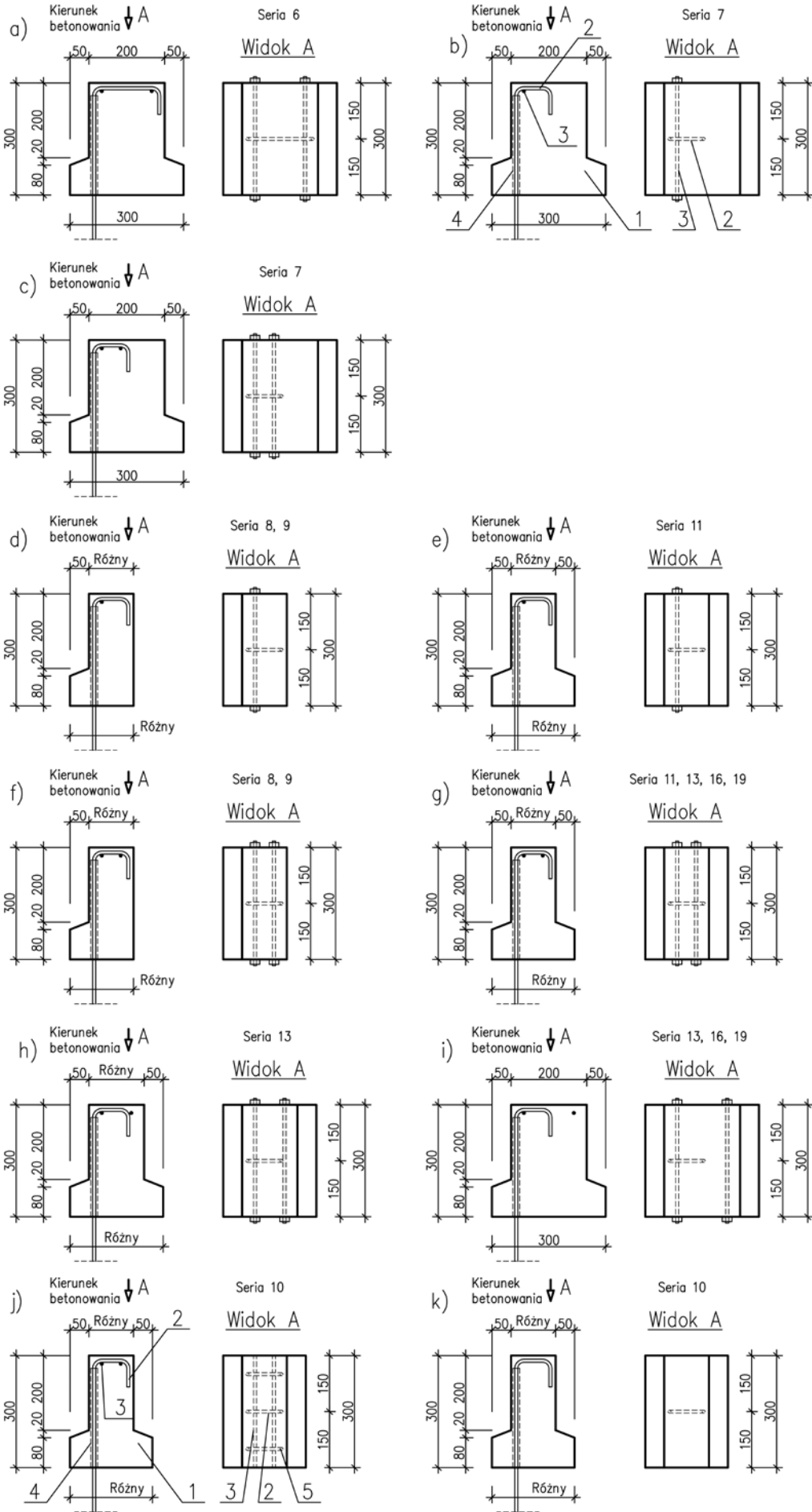
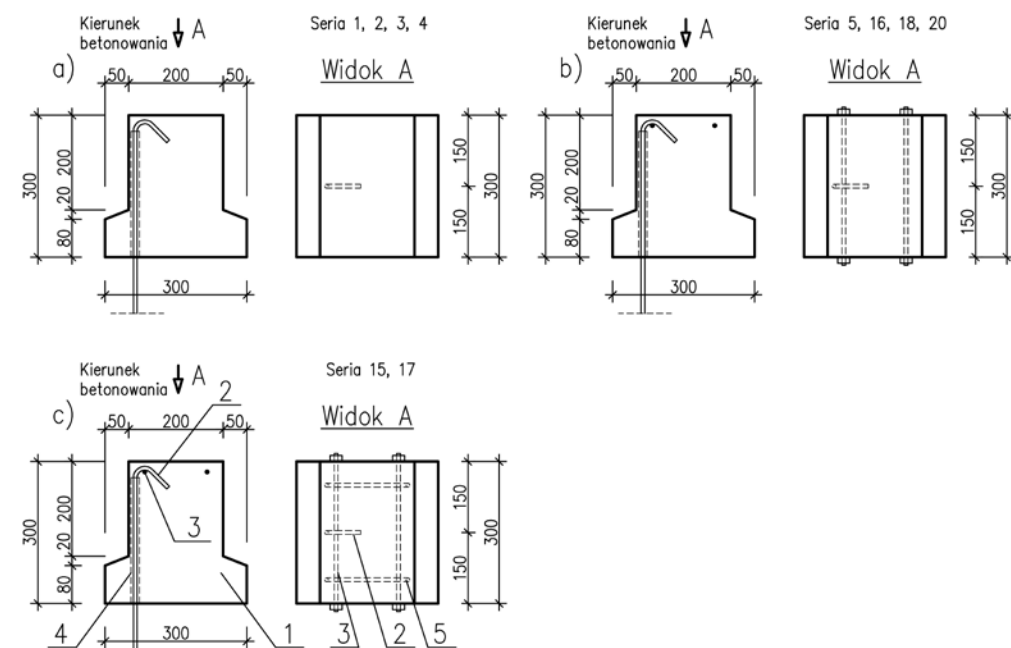


Rys. 11. →

Modele zbrojone strzemieniem zakończonym hakiem poza normowym wg rys. 4c:
1 – blok betonowy, 2 – strzemię, 3 – pręty podłużne, 4 – rurka PCV, 5 – „spinki”.

Rys. 12.

Modele zbrojone strzemieniem zakończonym hakiem ostrym 135° wg rys. 4b:
1 – blok betonowy, 2 – strzemię, 3 – pręty podłużne, 4 – rurka PCV, 5 – „spinki”.



Stanowisko i przebieg badania

Podstawowym elementem stanowiska badawczego była powiększona (rys. 13) płyta robocza prasy hydraulicznej DR BM 300, stanowiącej wyposażenie Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Elementy badawcze ustawiano na płycie prasy, po czym montowano czujniki pomiarowe, jak również urządzenie służące do wyrywania pręta strzemienia – rys. 14a. Modele, które badano przy udziale sił prostopadłych do płaszczyzny haka strzemienia, dodatkowo wsuwano pod tłok prasy DR BM 300 i ściskano – rys. 14b.

Ściskane w prasie elementy badawcze starano się obciążać w prasie tak, aby blok betonowy odkształcał się możliwie równomiernie. W tym celu prowadzono kontrolę odkształceń modelu za pomocą czujników indukcyjnych, znajdujących się na jego powierzchniach bocznych i dokonujących pomiaru zmiany długości bazy pomiarowej – rys. 15. Dodatkowo pomiędzy prasę a modele wstawiano płytę pilśniową miękką, aby wyrównać ewentualne nierówności powierzchni docisku.

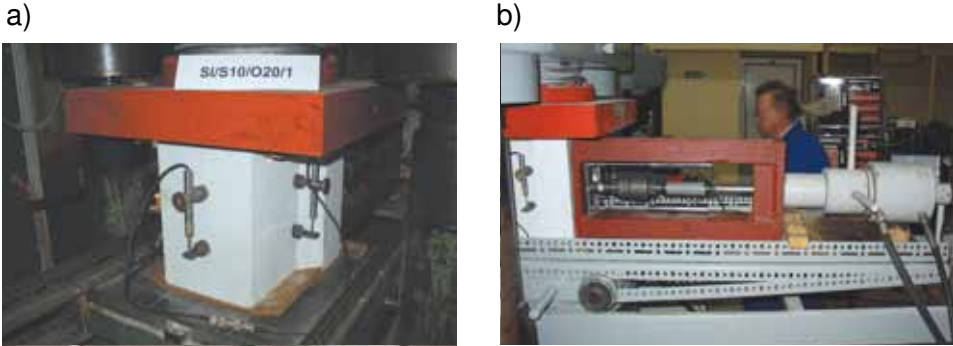
W elementach nie obciążonych siłami pionowymi w prasie zastosowano jeden czujnik indukcyjny zlokalizowany na czole modelu, mający na celu pomiar sumy rozwartości rys poziomych w obrębie haka – rys. 16.

Strzemiona wyrywano z elementu za pomocą prasy hydraulicznej, tzw. „zrywarki”, o nośności 100 kN i maksymalnym wysuwie tłoka wynoszącym 50 mm. Urządzenie to zaparto o badany model poprzez konstrukcję stalową składającą się z zespawanych ze sobą dwóch ceowników C140. Wyrywany pręt podchwyciono głowicą stalową z dwoma stożkami zaciskowymi. Jej koniec połączono z wałkiem średnicy 25 mm stanowiącym siłomierz, który przykręcono do „zrywarki”. Schemat działania urządzenia do naciągu, a w dalszej kolejności zrywania pręta strzemienia, przedstawiono na rys. 17.

W trakcie badania dokonywano pomiarów wysuwu strzemienia za pomocą przymocowanego do niego „motylka” (rys. 18a) oraz dwóch czujników indukcyjnych rozlokowanych symetrycznie po dwóch stronach pręta (rys. 18b) i przymocowanych do urządzenia oporowego.

Rys. 13.

Prasa hydrauliczna DR BM 300:
a) przed i b) po modyfikacji (powiększeniu blatu roboczego).



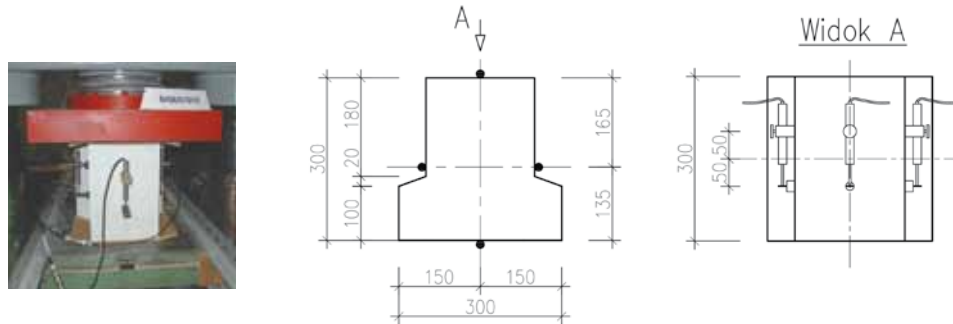
Rys. 14.

Widok stanowisk do badania modeli:
a) nie obciążonych siłami prostopadłymi do płaszczyzny haka strzemiennia,
b) ze ściskaniem prasą DR BM 300.



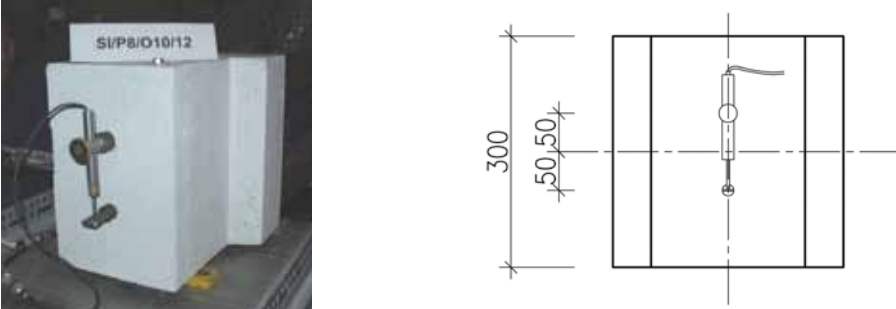
Rys. 15.

Czujniki indukcyjne pomiaru przemieszczeń punktów bazy umieszczone na przedłużeniu środka ciężkości elementu (występują tylko w elementach poddanych ściskaniu w prasie hydraulicznej).



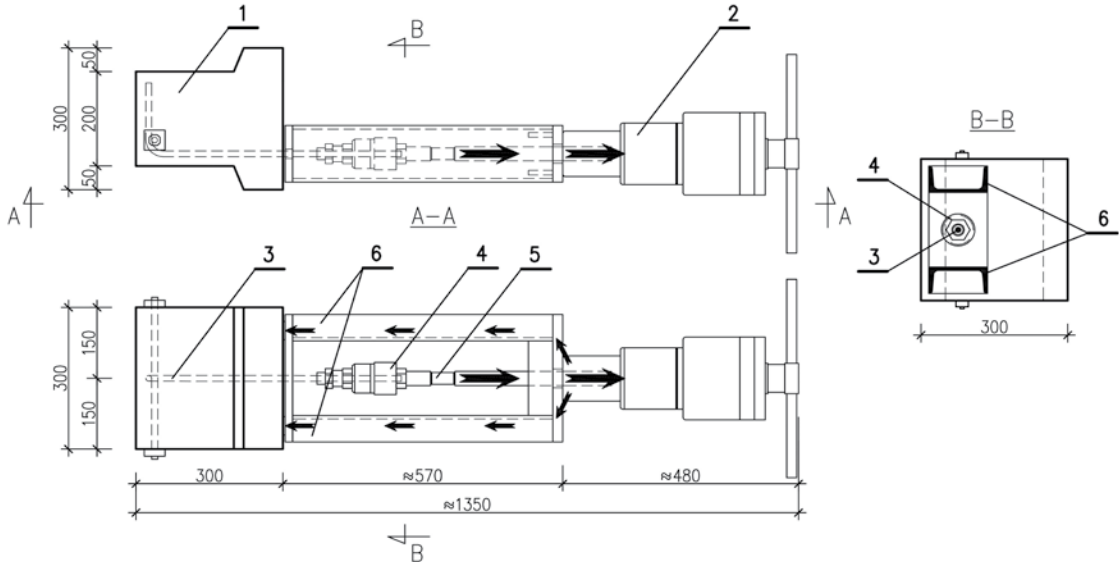
Rys. 16.

Pomiar zarysowania powstałego na czole modelu.



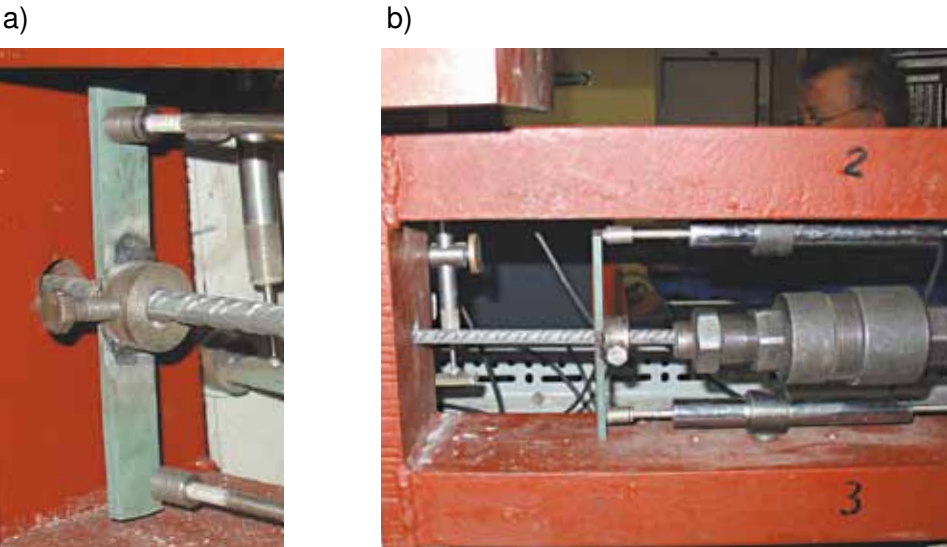
Rys. 17.

Schemat obciążenia modeli (nie uwzględniający nacisku prasy):
1 – blok betonowy, 2 – siłownik tzw. „zrywarka”, 3 – strzemię, 4 – głowica kotwiąca,
5 – siłomierz, 6 – urządzenie oporowe w postaci 2C140.



Rys. 18.

Czujniki pomiaru wysuwu strzemiennia z elementu podczas jego obciążania:
a) „motylek” na przecie, b) czujniki indukcyjne w trakcie pomiaru.



Program badań elementów nie obciążonych w prasie DR BM 300 (tj. bez wprowadzania naprężeń prostopadłych do płaszczyzny haka) był zgodny ze schematem przedstawionym na rys. 19.

Program ten charakteryzował się dwoma cyklami. W pierwszym cyklu elementy obciążono do wartości około 10% granicy plastyczności zbrojenia strzemienia F_{pl} , kontrolując tym samym wskazania aparatury pomiarowej oraz dopasowując ruchome elementy stanowiska do pozycji wyjściowych (likwidacja luzów). W drugim cyklu monotonicznie zwiększano siłę naciągu pręta strzemienia do momentu utraty jego nośności. Co każde 5 kN wzrostu obciążenia następowała przerwa 20 sek., w trakcie której utrzymywano wartość siły. W cyklu tym starano się osiągnąć granicę plastyczności zbrojenia F_{pl} , która w zależności od średnicy pręta średnio wynosiła:

dla średnicy 8 mm $\approx 29,7$ kN $\approx 591,5$ MPa
 dla średnicy 10 mm $\approx 43,1$ kN $\approx 549,4$ MPa
 dla średnicy 12 mm $\approx 58,2$ kN $\approx 514,6$ MPa

Kolejnym krokiem było dalsze zwiększanie siły naciągu pręta do chwili jego zerwania, czyli osiągnięcia wytrzymałości na rozciąganie F_{max} , której średnia wartość wynosiła:

dla średnicy 8 mm $\approx 36,0$ kN $\approx 716,6$ MPa
 dla średnicy 10 mm $\approx 49,8$ kN $\approx 634,7$ MPa
 dla średnicy 12 mm $\approx 69,5$ kN $\approx 615,2$ MPa

Program badań z użyciem prasy do wywołania naprężeń ściskających w betonie przedstawiono na rys. 20.

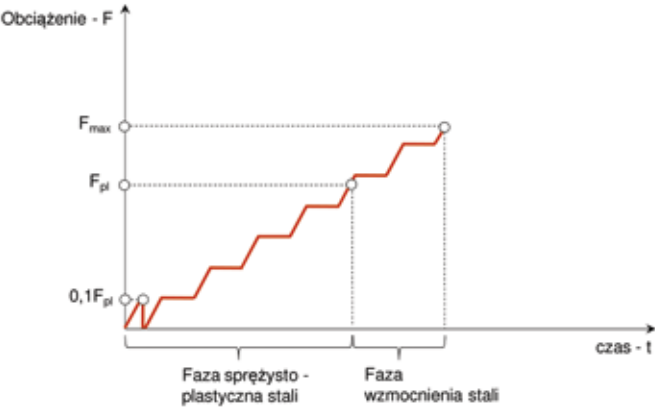
Zasadnicza część planu badania, polegająca na wyrywaniu strzemienia z modelu, nie uległa zmianie w stosunku do modelu nie obciążonego w prasie. Różnica polegała na rozpoczęciu naciągu pręta dopiero po wprowadzeniu sił pionowego nacisku (P) i ustabilizowaniu ich na żądanym poziomie. Siły te były utrzymywane na stałym poziomie i powodowały powstanie naprężeń ściskających σ_c w modelach (siła/pole powierzchni elementu) o wartościach:

Seria Zasadnicza I: modele zbrojone strzemionami o średnicy 10 i 12 mm – $\sigma_c \approx 7\%$ wytrzymałości kostkowej betonu,

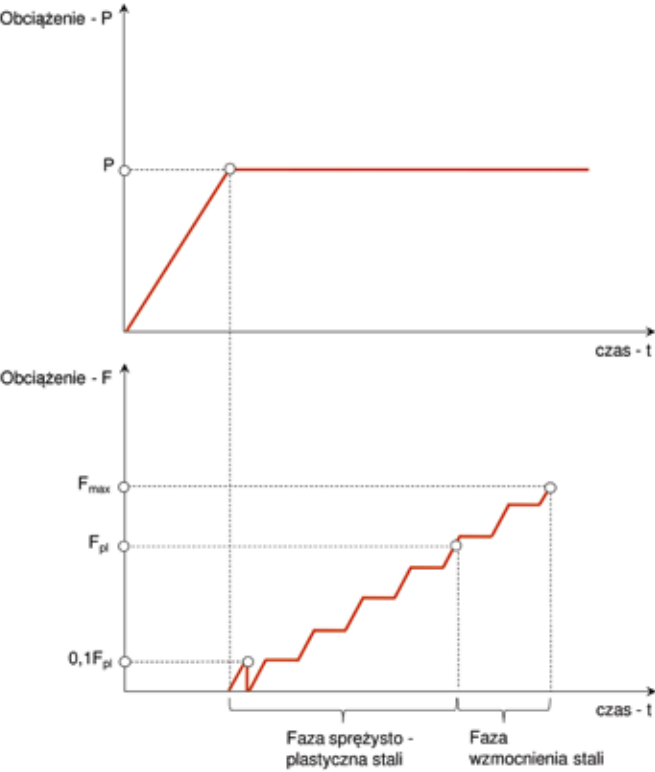
Seria Zasadnicza II: $\sigma_c \approx 85\%$ wytrzymałości kostkowej betonu,

Seria Zasadnicza X, XIV, XV, XVII: $\sigma_c \approx 75\%$ wytrzymałości kostkowej betonu.

Rys. 19.
Zakładany program obciążania modeli bez udziału nacisku prasy.



Rys. 20.
Zakładany program obciążania modeli z udziałem nacisku prasy.



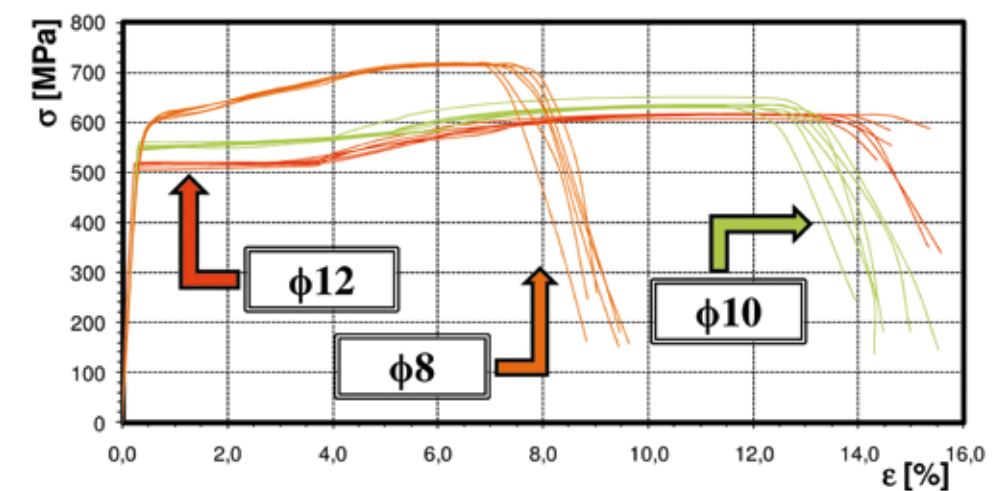
Stal

Do zbrojenia modeli użyto prętów wykonanych z dwóch gatunków stali: stali o dużej ciągliwości (B500SP – EPSTAL) – klasy C, oraz stali o średniej ciągliwości - klasy B wg [2], które ze względu na wartość charakterystycznej granicy plastyczności $f_{yk} \geq 500$ MPa, w myśl postanowień normy [3], zaliczają się do klasy A-IIIN. Badania stali wykonano na próbkach nieobrobionych sporządzając dla każdej próbki wykresy $\sigma - \epsilon$ (rys. 21).

W przypadku prętów o średnicy 8 mm stosunek $R_m/R_{p0,2}$ wynosił 1,21, a wartość $A_{gt} = 6,6\%$. Pręty o średnicy 10 mm, charakteryzowały się ilorazem R_m/R_{eh} wynoszącym 1,16 i wartością $A_{gt} = 11\%$, natomiast pręty zbrojenia o średnicy 12 mm stosunkiem $R_m/R_{eh} = 1,20$ i wartością odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej A_{gt} na poziomie 11,8%. Zgodnie z wymaganiami [2] zbrojenie o średnicy 8 mm spełniało wymagania klasy B, a pręty o średnicy 10 i 12 mm (EPSTAL) wymagania klasy C. Wyniki badań stali zestawiono w tabeli 2.

Rys. 21.

Zależności $\sigma - \epsilon$ nieobrobionych prętów.



Tablica 2.
Średnie wartości parametrów mechanicznych prętów nieobrobionych
badanych wg PN-EN 10002-1:1998.

Średnica	E [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	Odchylenie standardowe	R _m [MPa]	Odchylenie standardowe	A _{gt} [%]	Odchylenie standardowe
8 mm	200136	591,5	–	2,88	716,6	1,98	6,62	0,1
10 mm - EPSTAL	193791	–	549,4	5,23	634,7	7,44	11,01	0,08
12 mm - EPSTAL	194023	–	514,6	4,66	615,2	3,53	11,79	0,2

gdzie:

- E – moduł sprężystości stali,
- R_{p0,2} – naprężenie graniczne przy przyroście nieproporcjonalnym 0,2%,
- R_{eH} – górna granica plastyczności,
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie,
- A_{gt} – całkowite procentowe wydłużenie przy największej sile.

Beton

Do wykonania modeli każdej Serii zastosowano beton (2 zaroby = 2×4 lub 2×3 elementy badawcze) wykonywany na cemencie portlandzkim wieloskładnikowym CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R i kruszywie o maksymalnej średnicy ziaren 16 mm.

W dniu badania modeli Serii Zasadniczej, tj. po 6 dniach dojrzewania betonu, lub elementów Serii Uzupełniającej, tj. po ≈ 28 dniach dojrzewania betonu, średnie wartości parametrów mechanicznych określono dla każdego zarobu betonu na ≈: 3 próbkach kostkowych 150×150×150 mm, 3 walcach 150×300 mm w próbie brazylijskiej na rozłupywanie, 1 walcu 150×300 mm do określenia modułu sprężystości (wg PN-EN 12390:2002 i Instrukcji ITB nr 194). Sumarycznie zbadano ponad 250 elementów towarzyszących. Parametry materiałowe poszczególnych serii zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3.
Cechy mechaniczne użytego w badaniach betonu.

Seria	Średnia wartość parametru			
	Kostki 150x150x150 mm $f_{c,cube,m}$	Walce 150x300 mm $f_{ct,m}$	Walce 150x300 mm $f_{c,m}$	Walce 150x300 mm $E_{c,m}$
Zasadnicza I	23,8 MPa $v = 3,1\%$	2,25 MPa $v = 5,1\%$	–	–
Zasadnicza II	23,2 MPa $v = 4,2\%$	2,21 MPa $v = 7,1\%$	20,4 MPa	30484 MPa
Zasadnicza III	27,7 MPa $v = 7,8\%$	2,25 MPa $v = 13,8\%$	20,5 MPa	34862 MPa
Zasadnicza IV	24,1 MPa $v = 4,6\%$	2,00 MPa $v = 7,5\%$	21,3 MPa	32301MPa
Zasadnicza V	23,1 MPa $v = 8,1\%$	2,06 MPa $v = 3,8\%$	17,3 MPa	31811 MPa
Zasadnicza VI	23,6 MPa $v = 6,0\%$	2,04 MPa $v = 3,3\%$	17,2 MPa	36078 MPa
Zasadnicza VII	22,7 MPa $v = 8,5\%$	2,02 MPa $v = 4,1\%$	23,5 MPa	32994 MPa
Zasadnicza VIII	15,4 MPa $v = 10,7\%$	1,4 MPa $v = 7,9\%$	13,7 MPa	–
	21,9 MPa $v = 6,5\%$	1,74 MPa $v = 3,8\%$	21,1 MPa	–
Zasadnicza IX	26,8 MPa $v = 7,4\%$	2,25 MPa $v = 3,2\%$	–	–
Zasadnicza X	24,5 MPa $v = 6,2\%$	2,19 MPa $v = 3,3\%$	27,9 MPa	33696 MPa
Zasadnicza XI	36,6 MPa $v = 6,2\%$	2,67 MPa $v = 10,1\%$	34,5 MPa	41625 MPa
Zasadnicza XII	25,0 MPa $v = 3,8\%$	–	21,8 MPa	29366 MPa
Zasadnicza XIII	25,0 MPa $v = 1,5\%$	2,14 MPa $v = 3,8\%$	22,1 MPa	31018 MPa

Tablica 3 – cd.
Cechy mechaniczne użytego w badaniach betonu – ciąg dalszy.

Seria	Średnia wartość parametru			
	Kostki 150x150x150 mm $f_{c,cube,m}$	Walce 150x300 mm $f_{ct,m}$	Walce 150x300 mm $f_{c,m}$	Walce 150x300 mm $E_{c,m}$
Zasadnicza XIV	26,5 MPa $v = 2,9\%$	–	22,1 MPa	30834 MPa
Zasadnicza XV	23,6 MPa $v = 3,3\%$	–	20,2 MPa	33281MPa
Zasadnicza XVI	16,2 MPa $v = 8,9\%$	–	13,9 MPa	27186 MPa
Zasadnicza XVII	25,4 MPa $v = 3,4\%$	2,31 MPa $v = 6,5\%$	20,2 MPa	33098 MPa
Zasadnicza XVIII	30,6 MPa $v = 6,5\%$	2,92 MPa $v = 19,2\%$	–	–
Zasadnicza XIX	14,5 MPa $v = –$	1,11 MPa $v = –$	13,5 MPa	24232 MPa
	26,3 MPa $v = 10,7\%$	2,23 MPa $v = –$	20,8 MPa	36872 MPa
Zasadnicza XX	37,5 MPa $v = 7,2\%$	2,85 MPa $v = –$	34,8 MPa	40959 MPa

v – współczynnik zmienności.

Morfologia zarysowań

Mechanizm powstawania zarysowania w wypadku wszystkich zbadanych modeli był zbliżony. Pierwsze widoczne gołym okiem rysy o rozwartości 0,05 mm powstawały w obrębie haka strzemienia pierwszego zagięcia (rys. 22) i miały przebieg poziomy.

Rysy te w modelach spełniających wszystkie z poniższych wymagań, tj.:

- bez zbrojenia podłużnego,
- bez i przy udziale niewielkich naprężeń pionowych powstałych od ściskania w prasie ($\sigma_c \approx 7\% f_{c,cube}$),
- przy stosowaniu prętów strzemion giętych minimalną średnicą wynoszącą 4ϕ , jak również powiększoną do 8ϕ (nie dotyczy strzemion o średnicy 8 mm),
- z betonu o wytrzymałości na ściskanie $f_{c,cube} \leq 25$ MPa,

ulegały bardzo szybkiej propagacji i skutkowały w większości przypadków wręcz natychmiastowym pęknięciem próbki w płaszczyźnie pręta poprzecznego – rys. 23.

W modelach zbrojonych podłużnie prętami prostymi lub/i ściskanych bardzo dużymi pionowymi siłami powodującymi naprężenie w elemencie σ_c o wartościach $75 \div 85\% f_{c,cube}$, powstałe zarysowanie poziome nie skutkowało pękaniem elementu w płaszczyźnie haka. Dalsze zwiększanie obciążenia wyrywającego strzemię prowadziło w większości przypadków do powiększania się zasięgu i rozwartości zarysowania poziomego i w wypadku kotwienia pręta:

- hakiem prostym 90° – do powstania rys pionowych na jego końcu – rys. 24a,
- hakiem ostrym 135° – do powstania rys pionowych wzdłuż zbrojenia podłużnego zlokalizowanego wewnątrz zagięcia pręta – rys. 24b.
- hakiem poza normowym:
 - a) zgodnym z rys.11b (koniec pręta poprzecznego zakotwiono wewnątrz elementu, oraz zastosowano jeden pręt podłużny wewnątrz pierwszego zagięcia haka pręta), dochodziło do rozłupania modelu od strony drugiego zagięcia strzemienia (dotyczy średnicy 10 i 12 mm) – rys. 25,
 - b) przy zastosowaniu dwóch prętów podłużnych dochodziło do objęcia zarysowaniem poziomym znacznej części przekroju elementu – rys. 26.

Elementy poddane działaniu dużych sił ściskających poprzez nacisk w prasie hydraulicznej ($\sigma_c \geq 75\% f_{c,cube}$) w większości wypadków uległy zniszczeniu bez widocznego zarysowania.

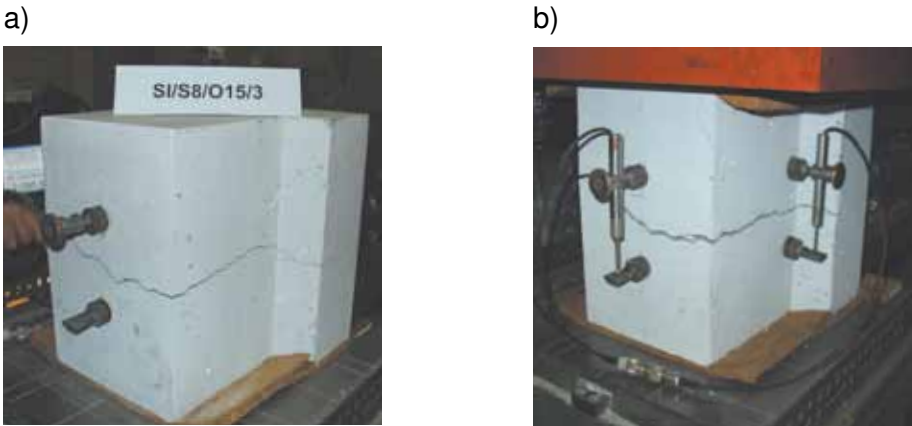
Rys. 22.

Rysa pozioma w obrębie pierwszego zagięcia strzemienia.



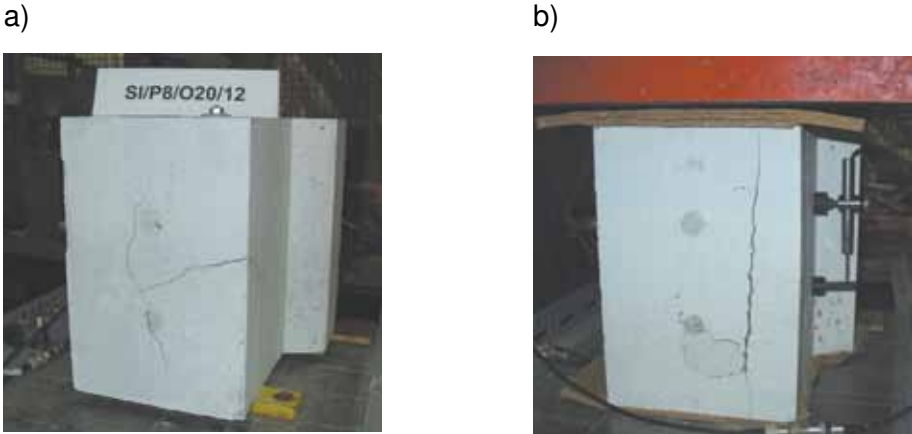
Rys. 23.

Pęknięcie niezbrojonych podłużnie modeli bezpośrednio po powstaniu rysy:
a) bez obciążenia pionowego, b) z udziałem prasy ($\sigma_c \approx 7\% f_{c,cube}$).



Rys. 24.

Zarysowanie pionowe w elementach, w których strzemiona kotwiono:
a) hakiem prostym 90°, b) hakiem ostrym 135°.



Rys. 25.

Zarysowanie poziome skutkujące pęknięciem modelu.



Rys. 26.

Zarysowanie poziome obejmujące zasięgiem cały hak strzemienia.



Tablica 4.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem prostym 90°.

Lp	Średnica strzemienia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
1	8 mm	10	SI-P8-O10-12 (P8)	484	A
2			SI-P8-O10-14/N/C (P8-8)	650	A
3			SI-P8-O10-17 (P8-8)	407	A
4			SII-P8-O10-18/C (P8)	440	A
5			SI-P8-O10-20/CM (P8)	695	C
6		15	SI-P8-O15-12 (P8)	636	A
7			SI-P8-O15-14/N/C (P8-8)	716	C
8		20	SI-P8-O20-12 (P8)	690	A
9			SI-P8-O20-14/N/C (P8-8)	674	C
10	10 mm	10	SI-P10-O10-12 (P10)	523	B
11			SI-P10-O10-14/N/C (P8-8)	649	C
12			SI-P10-O10-17 (P10-10)	523	B
13			SII-P10-O10-18/C (P10)	472	B
14			SI-P10-O10-20/CM (P10)	652	C
15		15	SI-P10-O15-12 (P10)	549	B
16			SI-P10-O15-14/N/C (P8-8)	656	C
17		20	SI-P10-O20-12 (P10)	643	B
18			SI-P10-O20-14/N/C (P8-8)	647	C
19	12 mm	15	SI-P12-O15-12 (P12)	531	B
20			SI-P12-O10-14/N/C (P8-8)	630	C
21			SI-P12-O15-17 (P12-12)	511	B
22			SI-P12-O15-17/N (P12-12)	619	C
23			SII-P12-O15-18/C (P12)	529	A
24			SI-P12-O15-20/CM (P12)	628	C
25		20	SI-P12-O20-12 (P12)	563	B
26			SI-P12-O20-14/N/C (P8-8)	625	C

Zniszczenie

Modele ze strzemieniem kotwionym hakiem prostym 90°

Modele, w których zbrojenie poprzeczne zakotwiono hakiem prostym, charakteryzowały się trzema schematami zniszczenia:

A - podczas obciążania dochodziło do spadku siły w pręcie przy jednoczesnym znacznym jego wysuwie z elementu. Dalsza próba obciążania skutkowała utrzymywaniem wartości siły i znacznym wysuwie strzemienia. Po pewnym czasie takiego obciążania dochodziło najczęściej do wyłamania otuliny na czole elementu, co skutkowało utratą nośności pręta. Po rozkuciu fragmentu modelu zauważono znaczne przemieszczenie strzemienia w zakotwieniu – rys. 27,

B - podczas obciążania dochodziło do nagłej i gwałtownej utraty nośności strzemienia spowodowanej wyłamaniem otuliny przez prostujący się pręt – rys. 28,

C - zerwaniem strzemienia.

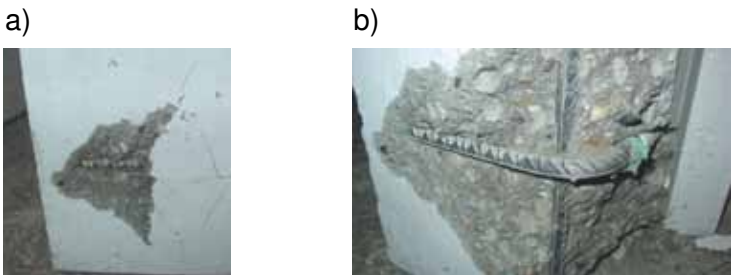
Rys. 27.

Zniszczony model badawczy na skutek utraty nośności strzemienia spowodowany poślizgiem pręta w zakotwieniu: a) po usunięciu otuliny, b) widok wykutego strzemiona - skrócony hak.



Rys. 28.

Zniszczone zakotwienie wskutek wyłamania otuliny: a) po badaniu, b) po usunięciu spękaną otuliny.



Modele ze strzemieniem kotwionym hakiem ostrym 135°

Utrata nośności strzemion zakończonych hakiem ostrym polegała na:

- A** - pęknięciu modelu w płaszczyźnie haka strzemienia w przypadku modeli nie zbrojonych podłużnie – rys. 29,
- B** - pęknięciu elementu wzdłuż pręta zbrojenia podłużnego i wyłamaniu krawędziowym otuliny wskutek wysuwania się zbrojenia poprzecznego z zakotwienia. Pręt mimo znacznych przemieszczeń do chwili „odrzucenia” otuliny przenosił znaczne siły – rys. 30,

Rys. 29.

Zniszczenie elementu poprzez jego pęknięcie (również w wypadku zastosowania średnicy zagięcia pręta 8 mm).



Rys. 30.

Utrata nośności zakotwienia pręta wskutek wyłamania fragmentu betonu.



C - gwałtownym wyłamaniu (zniszczeniu) części betonu na czole modelu wg rys. 31,

D - na osiągnięciu zakresu działania urządzenia naciągowego tj. maksymalnego wysuwu tłka 50 mm, bez widocznego na zewnątrz zniszczenia elementu,

E - na zerwaniu strzemienia – rys. 32.

Rys. 31.

Gwałtowne rozsadzenie fragmentu modelu przez prostujący się pręt.



Rys. 32.

Zerwany pręt poprzeczny.



Tablica 5.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem ostrym 135°.

Lp	Średnica strzemiesia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
1	8 mm	10	SI-S8-O10-1 (B)	520	A
2			SI-S8-O10-2/N (B)	623	E
3			SI-S8-O10-3/C (B)	498	A
4			SI-S8-O10-4/F (B)	717	E
5			SI-S8-O10-5 (P8-8)	668	E
6			SI-S8-O10-15/N (P8-8)	733	E
7			SI-S8-O10-16/CS (P8-8)	560	B
8			SII-S8-O10-18/C (P8-8)	539	C
9			SI-S8-O10-20/CM (P8-8)	705	E
10		15	SI-S8-O15-1 (B)	564	A
11			SI-S8-O15-2/N (B)	632	E
12			SI-S8-O15-3/C (B)	652	A
13			SI-S8-O15-4/F (B)	724	E
14			SI-S8-O15-5 (P8-8)	709	E
15			SI-S8-O15-15/N (P8-8)	676	E
16		20	SI-S8-O20-1 (B)	562	A
17			SI-S8-O20-2/N (B)	625	E
18			SI-S8-O20-3/C (B)	617	A
19			SI-S8-O20-4/F (B)	726	E
20			SI-S8-O20-5 (P8-8)	697	E
21			SI-S8-O20-15/N (P8-8)	726	E
22	10 mm	10	SI-S10-O10-1/Ns (B)	495	B
23			SI-S10-O10-2/N (B)	639	B
24			SI-S10-O10-3/C (B)	543	A
25			SI-S10-O10-4/F (B)	634	A
26			SI-S10-O10-5 (P10-10)	567	B
27			SI-S10-O10-15/N (P8-8)	645	E
28			SI-S10-O10-17/N (P10-10)	637	E
29			SII-S10-O10-18/C (P10-10)	544	C
30			SI-S10-O10-20/CM (P8-8)	638	E

Tablica 5 - cd.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem ostrym 135° – ciąg dalszy.

Lp	Średnica strzemiesia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
31	10 mm	15	SI-S10-O15-1/Ns (B)	613	A
32			SI-S10-O15-2/N (B)	549	C
33			SI-S10-O15-3/C (B)	521	A
34			SI-S10-O15-4/F (B)	584	A
35			SI-S10-O15-5 (P10-10)	623	C
36			SI-S10-O15-15/N (P8-8)	581	B
37			SI-S10-O15-17/N (P8-8)	632	E
38		20	SI-S10-O20-1/Ns (B)	570	D
39			SI-S10-O20-2/N (B)	575	E
40			SI-S10-O20-3/C (B)	531	A
41			SI-S10-O20-4/F (B)	632	A
42			SI-S10-O20-5 (P10-10)	645	E
43			SI-S10-O20-15/N (P8-8)	636	B
44			SI-S10-O20-16/CS (P10-10)	466	B
45			SI-S10-O20-17/N (P8-8)	632	E
46		15	SI-S12-O15-1/Ns (B)	469	C
47			SI-S12-O15-2/N (B)	541	B
48			SI-S12-O15-3/C (B)	427	A
49			SI-S12-O15-4/F (B)	534	A
50			SI-S12-O15-5 (P12-12)	526	B
51			SI-S12-O15-15/N (P8-8)	636	E
52			SI-S12-O15-17/N (P12-12)	awaria	
53			SII-S12-O15-18/C (P12-12)	575	B
54			SI-S12-O15-20/CM (P12-12)	631	E
55		20	SI-S12-O20-1/Ns (B)	574	E
56			SI-S12-O20-2/N (B)	602	E
57			SI-S12-O20-3/C (B)	412	A
58			SI-S12-O20-4/F (B)	539	A
59			SI-S12-O20-5 (P12-12)	536	C
60			SI-S12-O20-15/N (P8-8)	636	E

Modele ze strzemieniem kotwionym hakiem poza normowym

Utrata nośności zbrojenia poprzecznego zakotwionego hakiem poza normowym polegała na:

- A** - pęknięciu elementu betonowego na kierunku od drugiego zagięcia haka pręta (miało to miejsce w modelach zbrojonych podłużnie jednym prętem zlokalizowanym przy pierwszym zagięciu strzemienia o średnicy 10 i 12 mm) – rys. 33.
- B** - wyłamaniu bocznym otuliny z silnym zarysowaniem wzdłuż pręta podłużnego zlokalizowanego wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia – rys. 34.
Ten rodzaj zniszczenia zachodził w modelach, gdzie koniec zbrojenia poprzecznego posiadał znaczną otulinę betonową, a pręt podłużny był poza drugim jego zagięciem.

Rys. 33.

Poprzeczne pęknięcie modelu.



Rys. 34.

Wyłamanie krawędzi modelu (spękanie elementu).



- C** - wyłamaniu otuliny przez prostujący się koniec haka pręta – rys. 35. Tą formę zniszczenia obserwowano w modelach, w których koniec strzemienia posiadał minimalną otulinę.
- D** - gwałtownym spękaniu i rozpadnięciu się modelu na części (bez utraty przyczepności zbrojenia do betonu). Miał on najczęściej miejsce przy stosowaniu betonu o niskiej wytrzymałości – rys. 36.
- E** - zerwaniu strzemienia.

Rys. 35.

Widok prostującego się zagiętego ramienia strzemienia.



Rys. 36.

Element zniszczony wskutek spękania.



Tablica 6.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem poza normowym.

Lp	Średnica strzemienia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
1	8 mm	10	SI-WD8-O10-6 (P8-8)	718	E
2			SI-W8-O10-7-1 (P8)	713	E
3			SI-W8-O10-8/CS (P8)	542	C
4			SI-W8-O10-9/C (P8)	709	C
5			SI-W8-O10-10/N (P8-8)	731	E
6			SI-W8-O10-11/CM (P8)	688	E
7			SI-W8-O10-13 (P8-8)	696	E
8			SI-W8-O10-13-1 (P8-8)	731	E
9			SI-W8-O10-13-2 (P8-8)	704	E
10			SI-W8-O10-16-1/CS (P8-8)	730	E
11			SI-W8-O10-16/CS (P8-8)	570	C
12			SII-W8-O10-19/C (P8-8)	712	E
13			SII-W8-O10-19-1/CS (P8-8)	658	B
14		15	SI-WD8-O15-6 (P8-8)	728	E
15		20	SI-WD8-O20-6 (P8-8)	727	E

Tablica 6 – cd.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem poza normowym.

Lp	Średnica strzemienia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
16	10 mm	10	SI-WD10-O10-6 (P10-10)	653	E
17			SI-W10-O10-7-1 (P10)	645	E
18			SI-W10-O10-8/CS (P10)	486	C
19			SI-W10-O10-9/C (P10)	552	C
20			SI-W10-O10-10/N (P10-10)	653	E
21			SI-W10-O10-11/CM (P10)	648	E
22			SI-W10-O10-13 (P10-10)	643	E
23			SI-W10-O10-16/CS (P10-10)	518	D
24			SI-W10-O10-16-1/CS (P10-10)	652	E
25			SII-W10-O10-19/C (P10-10)	632	C
26			SII-W10-O10-19-1/CS (P10-10)	633	B
27		15	SI-WD10-O15-6 (P10-10)	651	E
28			SI-W10-O15-7-1 (P10)	644	E
29			SI-W10-O15-8/CS (P10)	500	C
30			SI-W10-O15-9/C (P10)	600	A
31			SI-W10-O15-10/N (P10-10)	656	E
32			SI-W10-O15-11/CM (P10)	623	E
33			SI-W10-O15-13-1 (P10-10)	648	E
34			SI-W10-O15-13-2 (P10-10)	642	E
35		20	SI-WD10-O20-6 (P10-10)	634	E
36			SI-W10-O20-7-1 (P10)	652	E
37			SI-W10-O20-8/CS (P10)	653	E
38			SI-W10-O20-9/C (P10)	588	A
39			SI-W10-O20-10/N (P10-10)	644	E
40			SI-W10-O20-11/CM (P10)	653	E

Tablica 6 – cd.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem poza normowym.

Lp	Średnica strzemienia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
41	12 mm	15	SI-WD12-O15-6 (P12-12)	646	E
42			SI-W12-O15-7-1 (P12)	634	A
43			SI-W12-O15-7-1 (P12-12W)	645	E
44			SI-W12-O15-8 (P12-12)	615	D
45			SI-W12-O15-8/CS (P16-12)	555	D
46			SI-W12-O15-9/C (P12-12)	636	E
47			SI-W12-O15-9/C (P16-12)	634	E
48			SI-W12-O15-10/N (B)	641	E
49			SI-W12-O15-10/N (P12-12)	631	E
50			SI-W12-O15-11/CM (P12-12)	646	E
51			SI-W12-O15-11/CM (P16-12)	639	E
52			SI-W12-O15-13-2 (P12-12)	632	E
53			SI-W12-O15-16/CS (P12-12)	538	D
54			SI-W12-O15-16-1/CS (P12-12)	630	D
55			SII-W12-O15-19/C (P12-12)	641	E
56			SII-W12-O15-19-1/CS (P12-12)	466	D

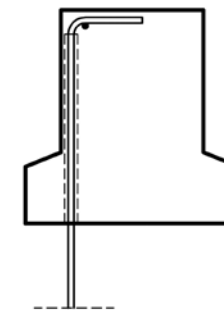
Tablica 6 – cd.
Wyniki nośności pręta zakotwionego hakiem poza normowym.

Lp	Średnica strzemienia	Otulina [mm]	Oznaczenie modelu	Siła niszcząca [kN]	Schemat zniszczenia
57	12 mm	20	SI-WD12-O20-6 (P12-12)	613	E
58			SI-W12-O20-7-1 (P12)	600	A
59			SI-W12-O20-7-1 (P12-12W)	625	E
60			SI-W12-O20-8 (P12-12)	636	E
61			SI-W12-O20-8 (P16-12)	641	E
62			SI-W12-O20-9/C (P12-12)	636	E
63			SI-W12-O20-9/C (P16-12)	638	E
64			SI-W12-O20-10/N (B)	634	E
65			SI-W12-O20-10/N (P12-12)	630	E
66			SI-W12-O20-11/CM (P12-12)	641	E
67			SI-W12-O20-11/CM (P16-12)	643	E
68			SI-W12-O20-13-1 (P12-12)	642	E

Nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$ bez naprężeń ściskających z prasy

Modele zbrojone hakiem prostym 90°

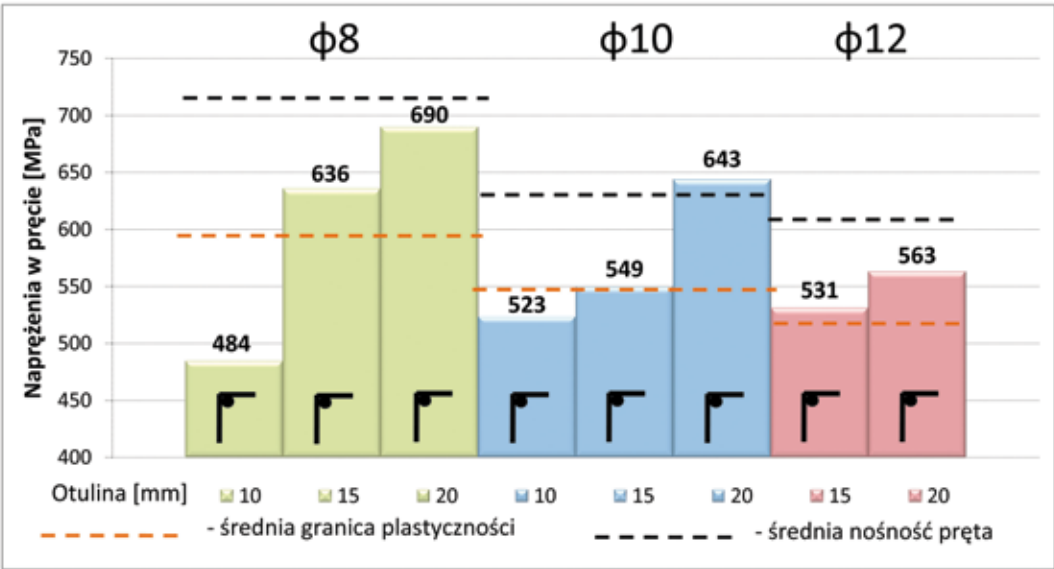
- Seria Zasadnicza XII
- $f_{c,cube} = 25 \text{ MPa}$



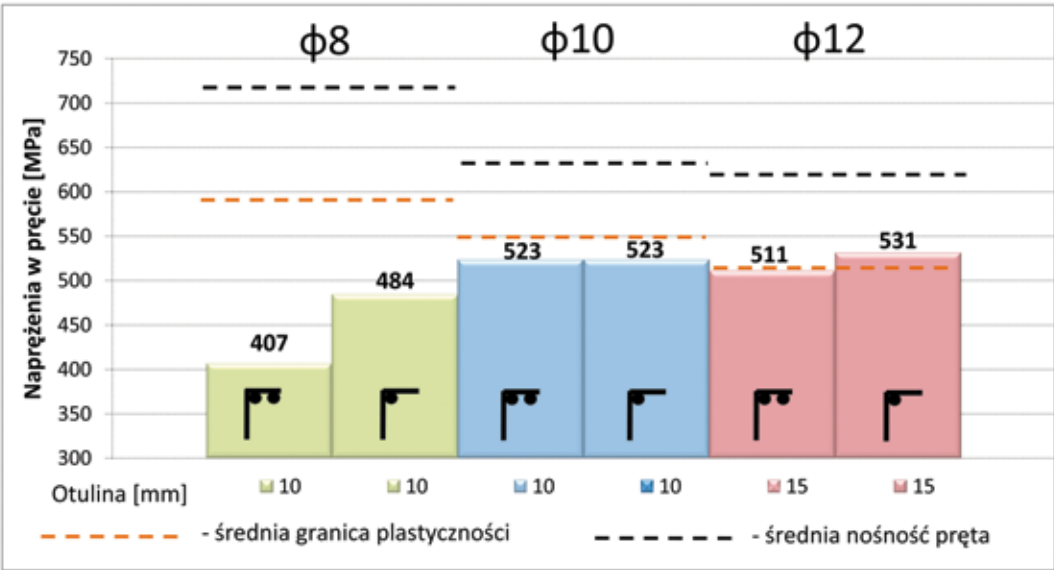
Strzemiona o średnicy 8 mm po przekroczeniu granicy plastyczności doznawały utraty przyczepności do betonu i ulegały wysunięciu z zakotwienia. Po znacznym skróceniu (przez wyciągnięcie) długości haka, dochodziło do wyłamania fragmentu powierzchni czoła modelu (rys. 27). Pręt o najmniejszej otulinie wynoszącej 10 mm nie osiągnął granicy plastyczności stali.

Strzemiona o średnicy 10 i 12 mm charakteryzowały się schematem zniszczenia zbliżonym do tego występującego przy kotwieniu prętów o średnicy 8 mm, z tą różnicą, iż nie odnotowywano dużych poślizgów prętów wewnątrz betonu, lecz dochodziło bezpośrednio do gwałtownego wyłamania otuliny i utraty nośności (rys. 28). Przy $c_{min} = 10 \text{ mm}$ strzemię o średnicy 10 mm uległo wyciągnięciu z betonu przed osiągnięciem granicy plastyczności. Przy kotwieniu zbrojenia hakiem prostym nie doprowadzono do zerwania prętów. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 37.

Rys. 37.
Otrzymane nośności strzemion kotwionych hakiem prostym 90°.



Rys. 38.
Porównanie nośności strzemion kotwionych hakiem prostym 90°.



Wpływ zbrojenia podłużnego zlokalizowanego przy końcu haka prostego 90° na nośność zakotwień strzemion

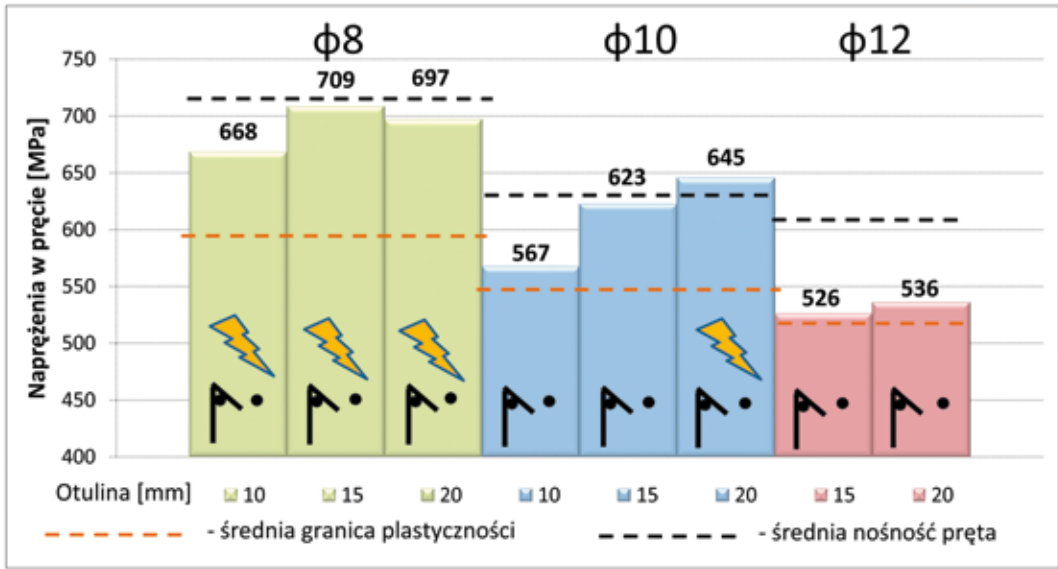
- Seria Zasadnicza XII
- $f_{c,cube} = 25,0 \text{ MPa}$
- Seria Zasadnicza XVII
- $f_{c,cube} = 25,4 \text{ MPa}$



Sposób zniszczenia jak również uzyskiwane nośności zakotwień strzemion o średnicy 8, 10 i 12 mm w elementach, w których zastosowano na zbrojenie podłużne dwa pręty proste nie różniły się w znaczący sposób od tych otrzymanych w modelach z jednym prętem podłużnym (wyjątek stanowi strzemię średnicy 8 mm, gdzie różnica pomiędzy nośnościami zakotwień wyniosła 77 MPa, na korzyść elementów z pojedynczym prętem podłużnym). Wyniki badań modeli z dwoma prętami podłużnymi przy najniższych analizowanych grubościach otulin zamieszczono na rys. 38.

Rys. 39.

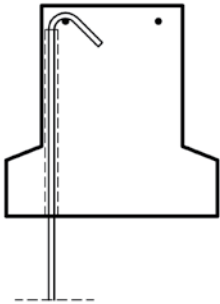
Otrzymane nośności strzemion kotwionych hakiem ostrym 135°.



– zerwanie się pręta.

Modele zbrojone hakiem ostrym 135°

- Seria Zasadnicza V
- $f_{c,cube} = 23,1 \text{ MPa}$



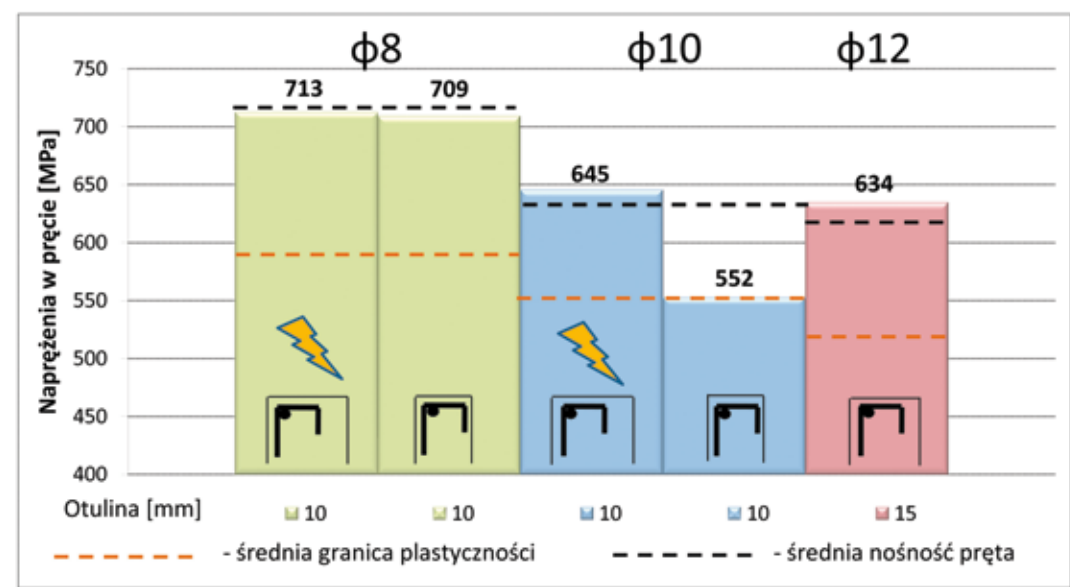
Strzemiona o średnicy 8 mm uległy zerwaniu przy każdej wartości analizowanej grubości otuliny.

Strzemiona o średnicy 10 mm osiągnęły pełną nośność przy największej grubości otuliny $c_{min} = 20 \text{ mm}$. Przy pozostałych mniejszych wartościach otulin wynoszących 10 i 15 mm, modele uległy zarysowaniu pionowemu wzdłuż zbrojenia podłużnego. Dalsze zwiększanie obciążenia zbrojenia powodowało pęknięcie pionowe elementu lub/i wyłamania znacznej części czoła elementu (rys. 30 i 31), tracąc tym samym zdolność do przenoszenia siły.

Strzemiona o średnicy 12 mm osiągnęły granicę plastyczności, po czym następowało zniszczenie analogiczne jak przy prętach o średnicy 10 mm. Zniszczenia modeli objęły znacznie większy obszar powierzchni betonu aniżeli miało to miejsce przy kotwieniu zbrojenia hakiem prostym. Uzyskane wyniki badań zamieszczono na rys. 39.

Rys. 40.

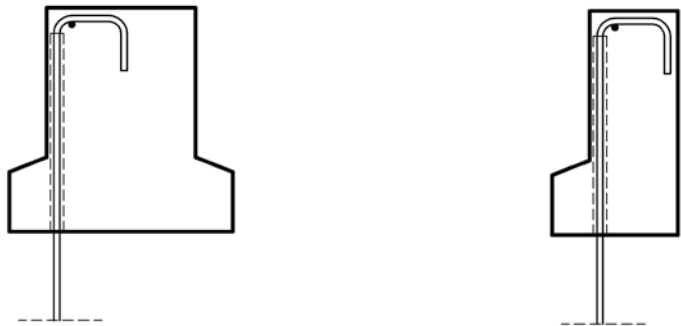
Otrzymane nośności strzemion kotwionych hakiem poza normowym.



– zerwanie się pręta.

Modele zbrojone hakiem poza normowym

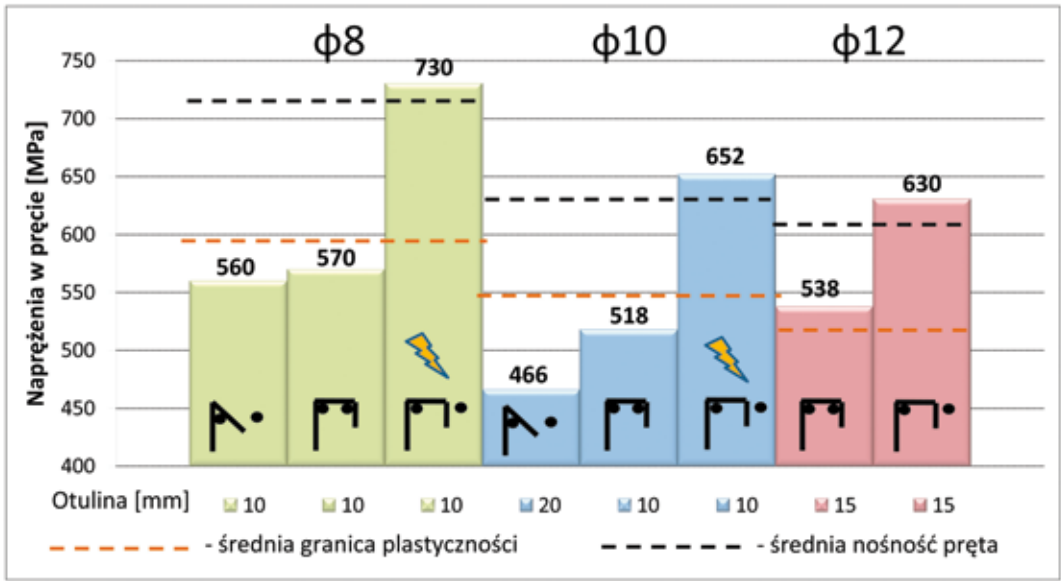
- Seria Zasadnicza VII
- $f_{c,cube} = 22,7 \text{ MPa}$
- Strzemiona o średnicy 8, 10 i 12 mm
- Seria Zasadnicza IX
- $f_{c,cube} = 26,8 \text{ MPa}$
- Strzemiona o średnicy 8 i 10 mm



Strzemiona, które zakotwiono głęboko w betonie, jak to ma miejsce przy typowych belkach żelbetowych (wyjątek stanowi pręt o średnicy 12 mm, gdzie doszło do pęknięcia elementu w płaszczyźnie haka na kierunku od drugiego zagięcia), osiągnęły pełną nośność i uległy zerwaniu. Strzemiona, w których pręt posiadał minimalną otulinę wzdłuż całego zakotwienia, uległ wyrwaniu z betonu poprzez wyłamanie otuliny na końcu haka pręta. Uzyskane wyniki badań zamieszczono na rys. 40.

Rys. 41.

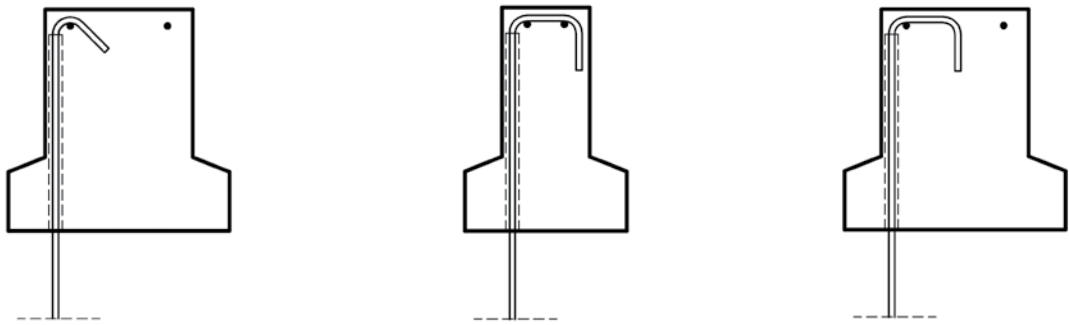
Otrzymane nośności strzemion kotwionych hakiem ostrym 135°.



— zerwanie się pręta.

Nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 18 \text{ MPa}$ bez naprężeń ściskających z prasy

➤ Seria Zasadnicza XVI
➤ $f_{c,cube} = 16,2 \text{ MPa}$



Przebadano serię elementów wykonanych przy przyjęciu średnicy strzemia, typu haka i grubości otuliny (najmniejsza) takich jak te, przy których doprowadzono do zerwania pręta przy betonie o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$. Wyniki zestawiono na rysunku 41.

Modele zbrojone strzemionami o średnicy 8 i 10 mm, kotwione hakiem ostrym 135° przy otulinie odpowiednio 10 i 20 mm nie osiągnęły granicy plastyczności strzemia. Dochodziło do utraty nośności poprzez boczne wyłamanie otuliny (rys. 30).

Utrata nośności przy kotwieniu strzemion o średnicy 8 mm hakiem poza normowym w przypadku umieszczenia obu prętów zbrojenia podłużnego wewnątrz haka i zmniejszenia szerokości próbki (rys. 11g) związana była z wyłamaniem otuliny przy końcu pręta (rys. 35).

Pozostałe modele zbrojone strzemionami o średnicy 10 i 12 mm i kotwione w sposób poza normowy (rys. 11g, 11i) ulegały zniszczeniu poprzez pęknięcie elementu na części (rys. 36).

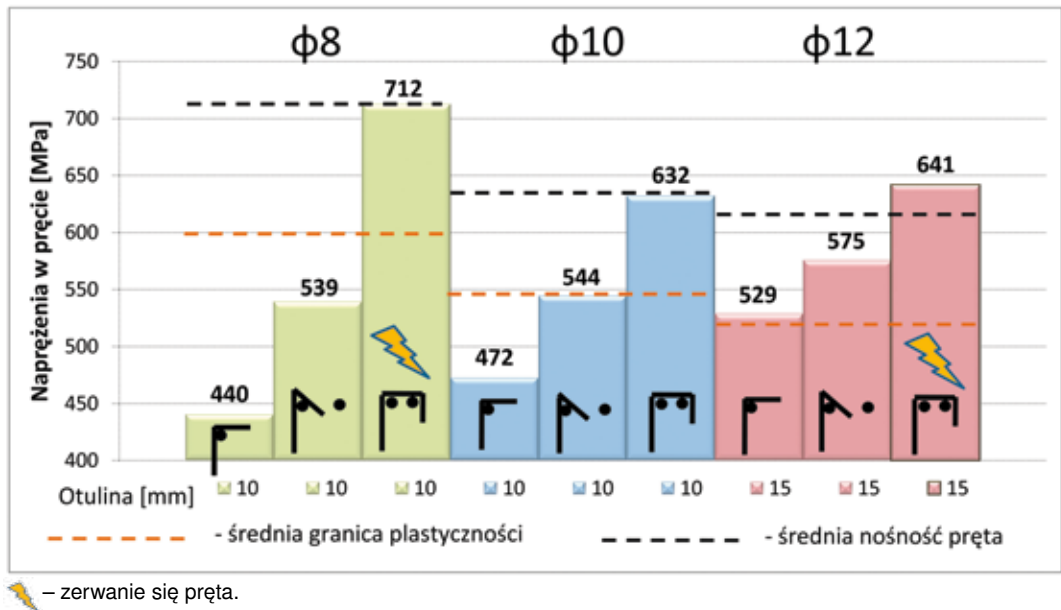
Tylko w strzemionach o średnicy 8 i 10 mm kotwionych w sposób typowy dla belek żelbetonowych (rys. 11i) doprowadzono do osiągnięcia naprężeń rozciągających skutkujących zerwaniem zbrojenia.

UWAGA:

Wykonano również badania nośności zakotwień w elementach 6-ciodniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 35 \text{ MPa}$, bez naprężeń ściskających z prasy. W wyniku badań strzemion zakotwionych w betonie hakiem poza normowym (rys. 11e), przy zastosowaniu pojedynczego pręta podłużnego zlokalizowanego wewnątrz pierwszego zagięcia haka, doprowadzono do zerwania pręta o średnicy 8 i 10 mm, przy przyjęciu najmniejszej z badanych otulin wynoszącej 10 mm. Analogiczny efekt uzyskano w wypadku strzemion o średnicy 8, 10 i 12 mm kotwionych hakami normowymi, tj. prostym i ostrym, przy wartości otuliny, określonej jako najbardziej niekorzystnej.

Rys. 42.

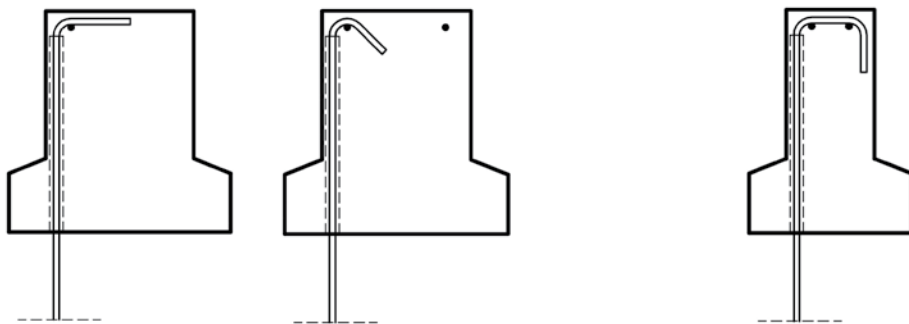
Otrzymane nośności strzemion kotwionych hakiem prostym, ostrym i poza normowym w betonie dwudziestośmiodniowym.



Nośność zakotwień w elementach 28-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$ bez naprężeń ściskających z prasy

➤ Seria Uzupełniająca XVIII
➤ $f_{c,cube} = 30,6 \text{ MPa}$

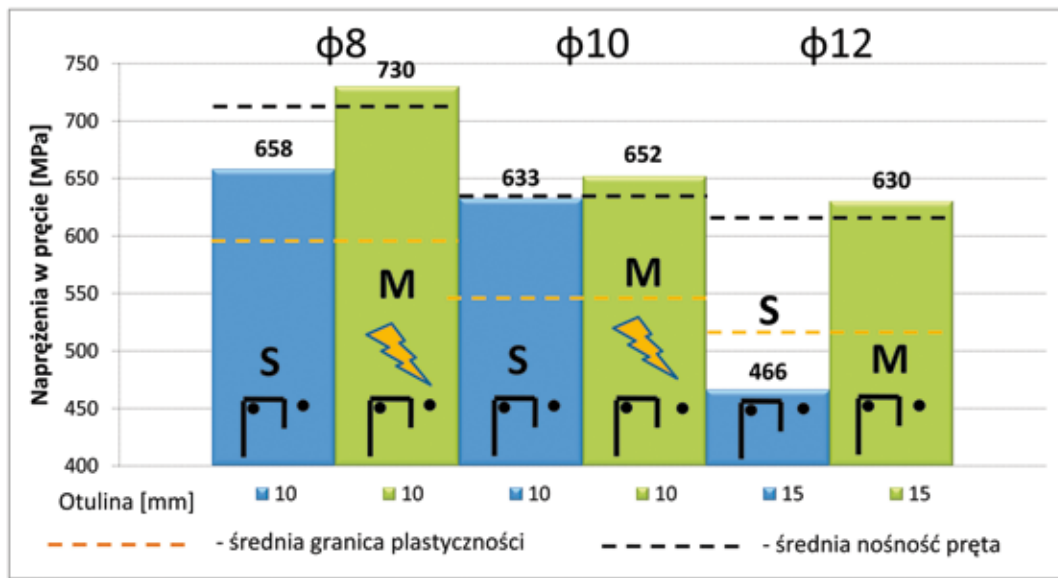
➤ Seria Uzupełniająca XIX
➤ $f_{c,cube} = 26,3 \text{ MPa}$



Uzyskane nośności modeli 28-dniowych w stosunku do modeli 6 dniowych (o zbliżonej wytrzymałości betonu na ściskanie) okazały się niższe. Wyniki badań elementów o długim czasie dojrzewania zamieszczono na rys. 42.

Rys. 43.

Wyniki badań zakotwienia strzemion hakiem poza normowym po 28 dniach dojrzewania modeli (S) i porównanie ich z nośnością zakotwień elementów 6-dniowych (M).

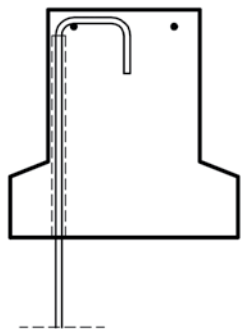


– zerwanie się pręta.

Porównanie nośności zakotwień w elementach 28-dniowych z modelami na betonie młodym 6-dniowym o planowanych wytrzymałościach $f_{c,cube} = 18 \text{ MPa}$ bez naprężeń ściskających z prasy

- Seria Uzupełniająca XIX
- $f_{c,cube} = 14,5 \text{ MPa}$
- Beton 28-dniowy (S)

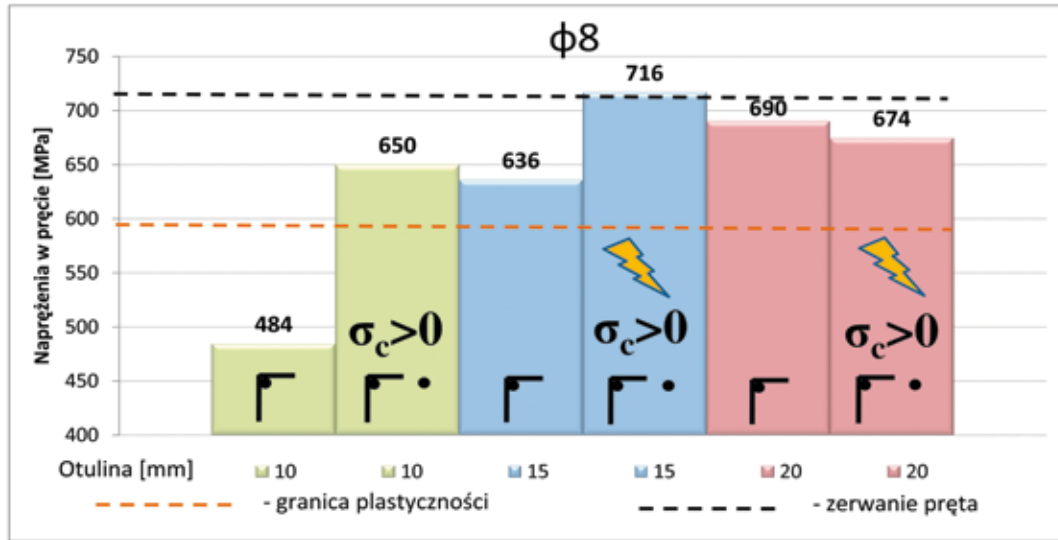
- Seria Zasadnicza XVI
- $f_{c,cube} = 16,2 \text{ MPa}$
- Beton 6-dniowy (M)



Przebadano rozwiązanie poza normowe wg rys. 11i, które jako jedyne (wg badań modeli 6-cio dniowych) było w stanie przenosić znaczne siły w wypadku zastosowania betonu niskiej wytrzymałości ($f_{c,cube} < 20 \text{ MPa}$) w elementach 28-dniowych. Zakotwienie strzemion o średnicy 12 mm uległo zniszczeniu przed osiągnięciem granicy plastyczności zbrojenia. Strzemię o średnicy 10 mm uzyskało zbliżoną nośność w modelu z betonu młodego i 28-dniowego i było bliskie zerwaniu. Dla strzemion o średnicy 8 mm ponownie wyniki nośności zakotwień zbrojenia uzyskane dla betonu młodego okazały się wyższe aniżeli dla betonu 28-dniowego. Porównanie wyników badań Serii Zasadniczej XIX (beton 28-dniowy o $f_{c,cube} \approx 14,5 \text{ MPa}$) i XVI (beton młody o $f_{c,cube} \approx 16,2 \text{ MPa}$) przedstawiono na rys. 43.

Rys. 44.

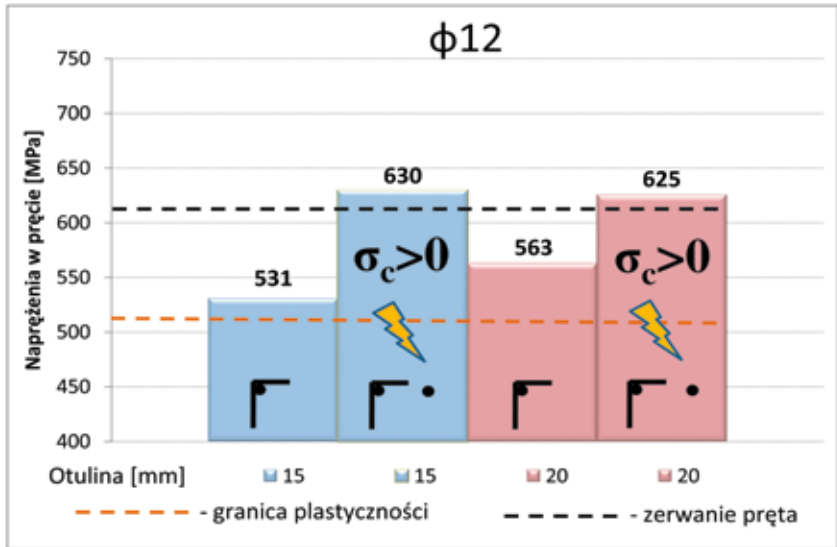
Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku prostym 90° poddanych działaniu dużych sił pionowych w prasie ($\sigma_c \approx 75\% f_{c,cube}$) - średnica 8 mm, otulina 10 do 20 mm i porównanie ich z wynikami badań modeli nie poddanych ściskaniu w prasie.



— zerwanie się pręta.

Rys. 45.

Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku prostym 90° poddanych działaniu dużych sił pionowych w prasie ($\sigma_c \approx 75\% f_{c,cube}$) - średnica 12 mm, otulina 15 do 20 mm i porównanie ich z wynikami badań modeli nie poddanych ściskaniu w prasie.



— zerwanie się pręta.

Wpływ ściskania w prasie na nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$ zbrojonych podłużnie

Modele zbrojone hakiem prostym 90°

- Seria Zasadnicza XIV
- $f_{c,cube} = 26,5 \text{ MPa}$
- $\sigma_c > 0$
- Seria Zasadnicza XII
- $f_{c,cube} = 25,0 \text{ MPa}$
- $\sigma_c = 0$

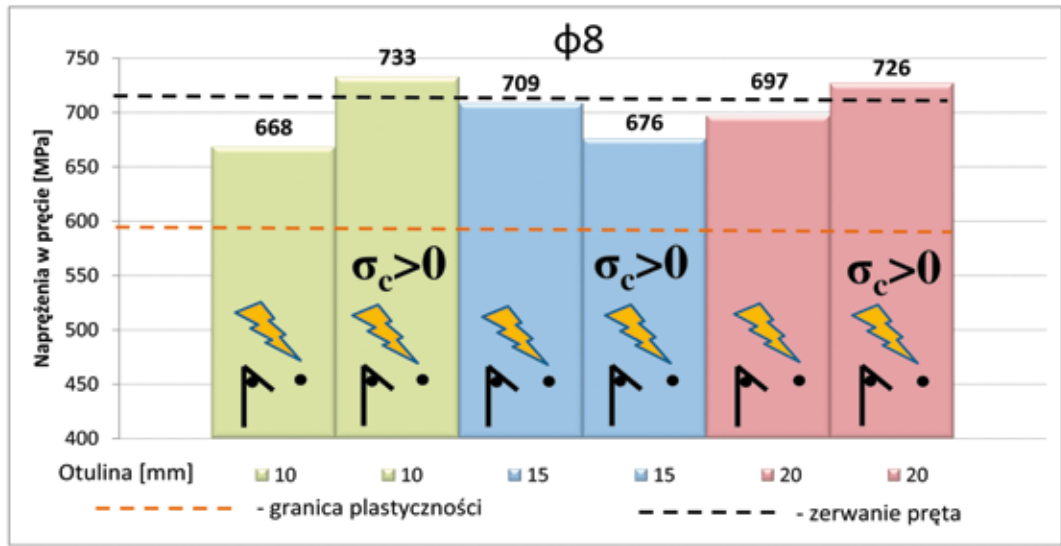


Wyniki badań modeli obciążonych siłą pionową powodującą naprężenie ściskające w elemencie wynoszące około 75% $f_{c,cube}$ w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych bez nacisku prasy, dla strzemion skrajnych badanych średnic, tj. 8 i 12 mm przedstawiono na rys. 44 ÷ 45.

Dla każdego z analizowanych przypadków (łącznie ze strzemionami o średnicy 10 mm), nacisk prostopadły do płaszczyzny haka skutkował wzrostem nośności zakotwienia i osiągnięciem zerwania pręta (wyjątek stanowił pręt o średnicy 8 przy najmniejszej grubości otulenia wynoszącej 10 mm, gdzie pręt uległ wyciągnięciu z betonu).

Rys. 46.

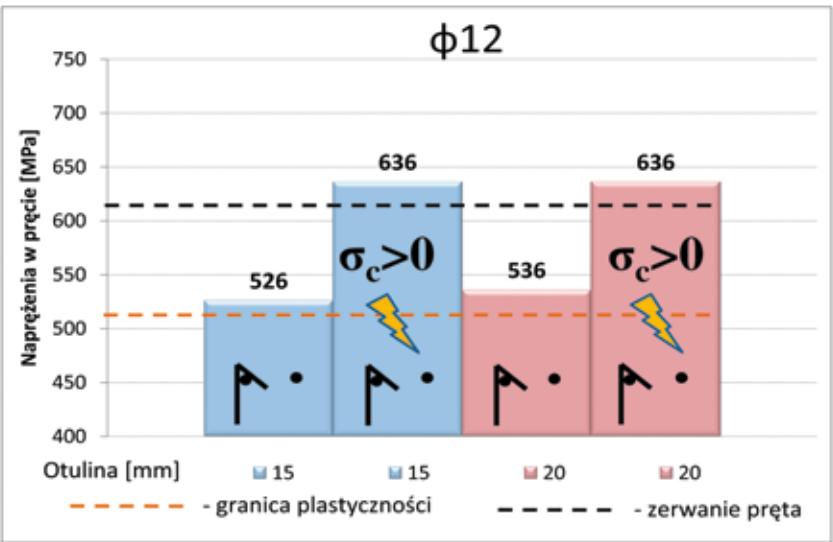
Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym poddanych działaniu dużych sił ściskających w prasie ($\sigma_c \approx 75\% f_{c,cube}$) – średnica pręta 8 mm, otulina 10 do 20 mm i porównanie ich z wynikami badań modeli nie poddanych ściskaniu w prasie.



– zerwanie się pręta.

Rys. 47.

Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym przy ściskaniu elementu w prasie ($\sigma_c \approx 75\% f_{c,cube}$) – średnica 12 mm, otulina 15 do 20 mm i porównanie ich z wynikami badań modeli nie poddanych ściskaniu w prasie.

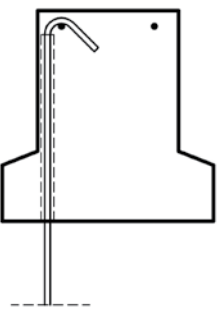
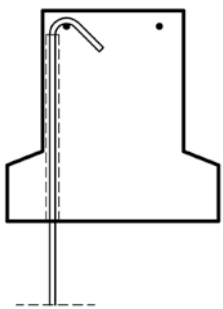


– zerwanie się pręta.

Modele zbrojone hakiem ostrym 135°

- Seria Zasadnicza XV
- $f_{c,cube} = 23,6 \text{ MPa}$
- $\sigma_c > 0$

- Seria Zasadnicza V
- $f_{c,cube} = 23,1 \text{ MPa}$
- $\sigma_c = 0$

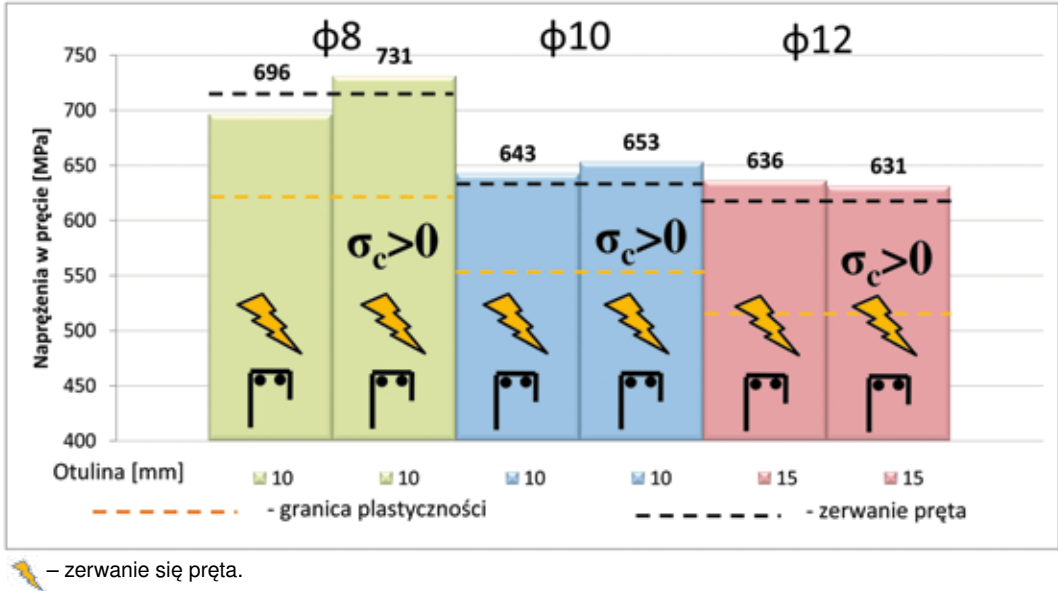


Wyniki badań modeli obciążonych siłą powodującą naprężenie pionowe w elemencie wynoszące około 75% $f_{c,cube}$ w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych bez nacisku prasy dla strzemion skrajnych badanych średnic tj. 8 i 12 mm przedstawiono na rys. 46÷47.

Uzyskano wyniki analogiczne jak przy zbrojeniu hakiem prostym, tj. w każdym analizowanym przypadku (wyjątek stanowi zbrojenie w postaci prętów o średnicy 10 mm przy otulinie 15 i 20 mm z Serii Zasadniczej XV, gdzie uległo ono wyciągnięciu z betonu – elementy te powtórzone w Serii Zasadniczej XVII ($f_{c,cube} = 25,4 \text{ MPa}$), gdzie nastąpiło zerwanie prętów) uzyskano wzrost nośności zakotwienia i zerwanie pręta strzemienia.

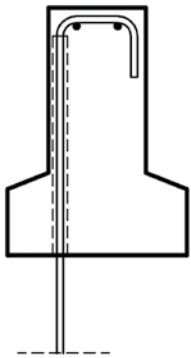
Rys. 48.

Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku poza normowym, poddanych działaniu dużych sił pionowych w prasie ($\sigma_c \approx 75\% f_{c,cube}$) – średnica 8, 10 i 12 mm przy minimalnych grubościach otulin i porównanie ich z wynikami badań modeli nie poddanych ścisaniu w prasie.



Modele zbrojone hakiem poza normowym

- Seria Zasadnicza X
- $f_{c,cube} = 24,5$ MPa
- $\sigma_c > 0$
- Strzemiona o średnicy 8, 10 i 12 mm
- Seria Zasadnicza XIII
- $f_{c,cube} = 25,0$ MPa
- $\sigma_c = 0$
- Strzemiona o średnicy 8 i 10 mm
- Seria Zasadnicza IX
- $f_{c,cube} = 26,8$ MPa
- $\sigma_c = 0$
- Strzemiona o średnicy 12 mm

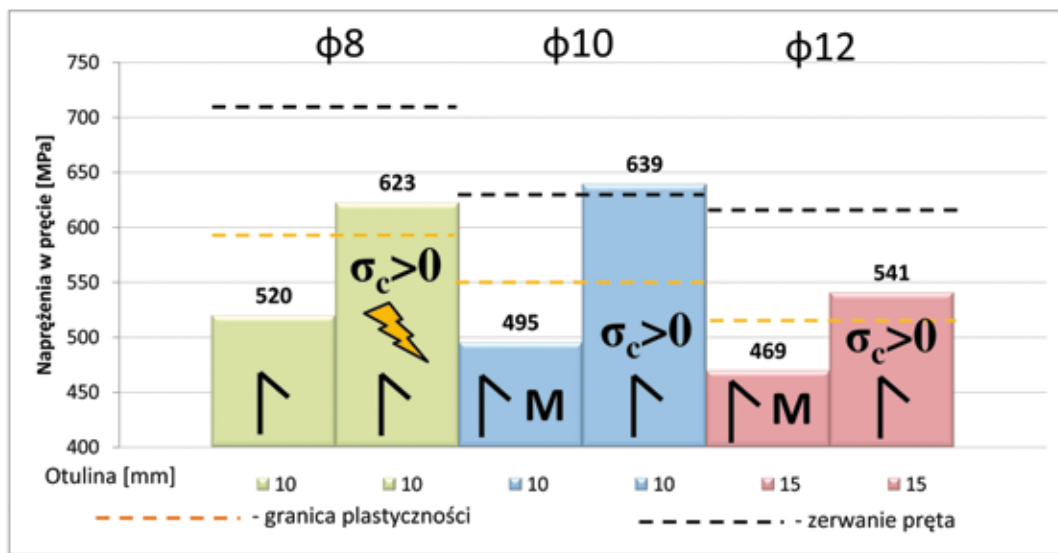


Wyniki badań modeli obciążonych siłą powodującą naprężenie pionowe ściskające w elemencie wynoszące około 75% $f_{c,cube}$ w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych bez nacisku prasy, dla strzemion skrajnych badanych średnic, tj. 8 i 12 mm, przedstawiono na rys. 48.

Naprężenia ściskające prostopadłe do płaszczyzny zagięcia haka nie wpłynęły negatywnie na uzyskiwane nośności zakotwienia i jak w wypadku modeli bez obciążenia w prasie osiągnięto pełną nośność strzemion.

Rys. 49.

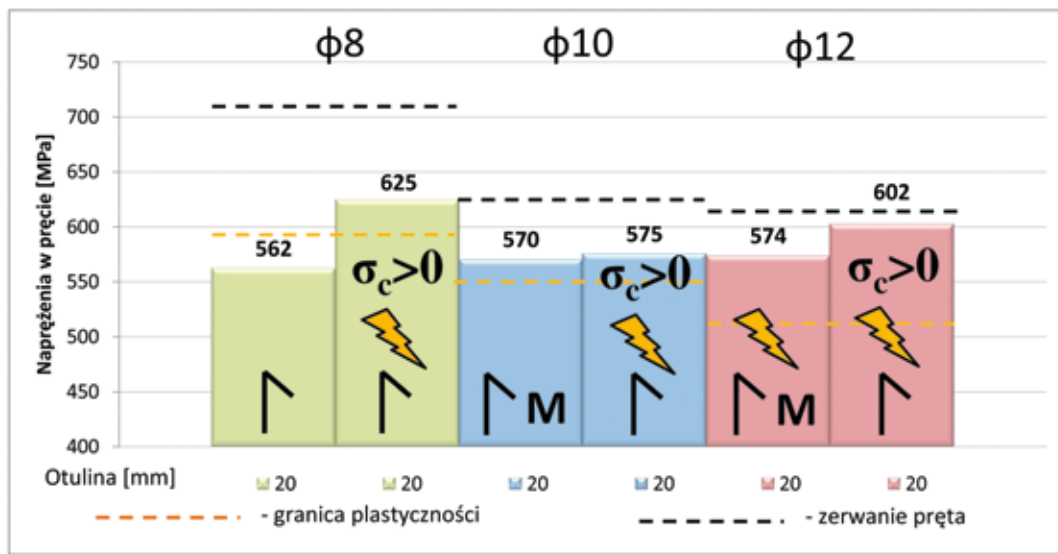
Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym 135°, poddanych działaniu dużych sił pionowych (σ_c) w prasie w porównaniu do elementów nie obciążonych lub ściskanych niewielkimi siłami (M) – przy przyjęciu najbardziej niekorzystnych (najmniejszych) grubości otulin.



– zerwanie się pręta.

Rys. 50.

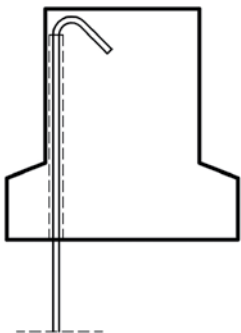
Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym 135°, poddanych działaniu dużych sił pionowych (σ_c) w prasie w porównaniu do elementów nie obciążonych lub ściskanych niewielkimi naprężeniami (M) – przy przyjęciu otuliny grubości 20 mm.



– zerwanie się pręta.

Wpływ ściskania w prasie na nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$ bez zbrojenia podłużnego

- Seria Zasadnicza II
- $f_{c,cube} = 23,2 \text{ MPa}$
- $\sigma_c > 0 \approx 85 \% f_{c,cube}$ – średnica 8, 10 i 12 mm
- $\sigma_c = 0 \text{ MPa}$ – średnica 8 mm
- $\sigma_c \approx 7 \% f_{c,cube}$ – średnica 10 i 12 mm (M)



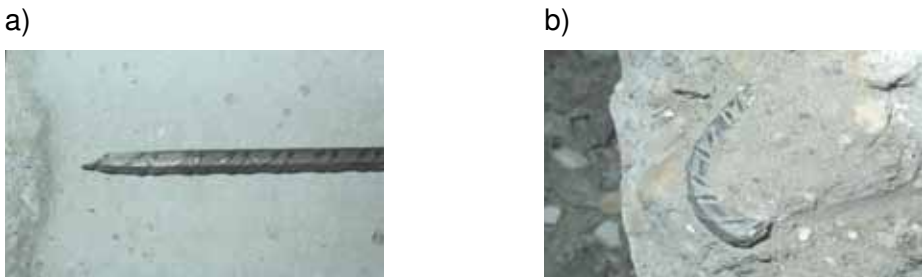
Wyniki badań modeli obciążonych siłą pionową powodującą naprężenie ściskające w elemencie wynoszące około 85% $f_{c,cube}$, w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych bez nacisku prasy (lub o niewielkiej wartości $\approx 7\% f_{c,cube}$), dla strzemion o średnicy 8, 10 i 12 mm, przy przyjęciu najmniejszej i największej grubości otulin spośród przebadanych, przedstawiono na rys. 49 i 50.

Naprężenia ściskające prostopadłe do płaszczyzny zagięcia haka, nawet o niewielkiej wartości (M) wpływały pozytywnie na uzyskiwane nośności zakotwień prętów. Zaobserwowano przy otulinie grubości 10, 15 i 20 mm, że otrzymywane maksymalne nośności zakotwień są w większości przypadków mniejsze od wytrzymałości zbrojenia na rozciąganie.

Strzemiona o średnicy 8 mm urywały się na początku zagięcia haka – rys. 51, przy naprężeniach znacznie niższych od uzyskiwanych w badaniach materiałowych stali, co można tłumaczyć karbem powstałym po gięciu pręta. Pręty o średnicy 10 i 12 mm przy otulinie 20 mm ulegały zerwaniu poza hakiem. Nie ustalono co było czynnikiem obniżenia maksymalnych naprężeń przenoszonych przez pręt.

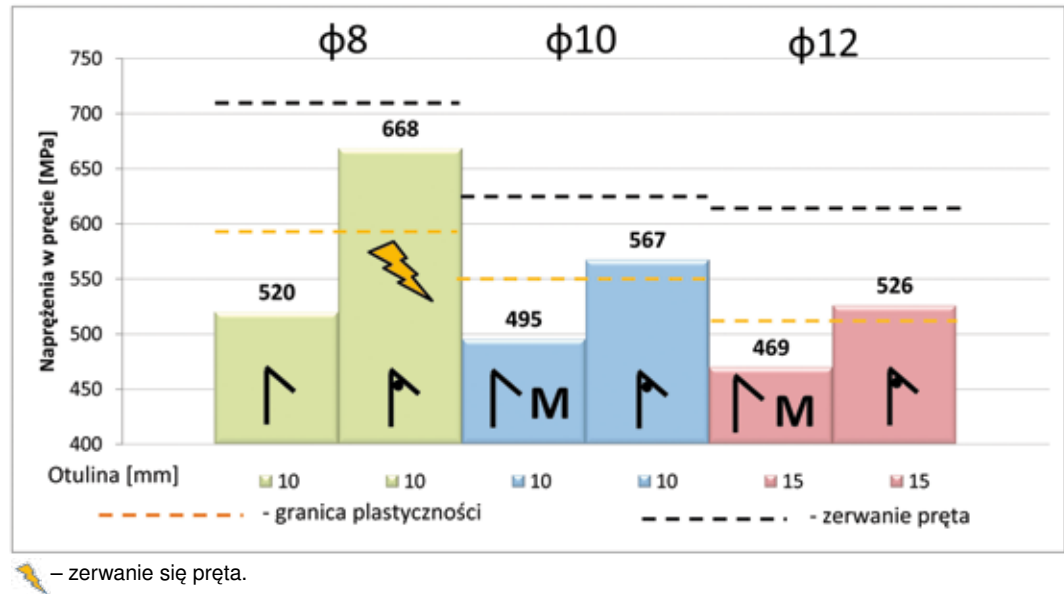
Rys. 51.

Zerwane strzemiona o średnicy 8 mm w elementach o grubości otulin: a) 10 mm, b) 20 mm.



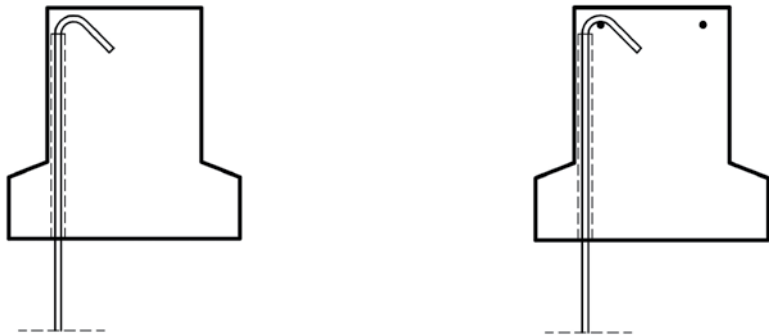
Rys. 52.

Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym 135°, poddanych działaniu niewielkich sił ściskających (0% lub 7% $f_{c,cube}$ (M)) w prasie w porównaniu do elementów nieobciążonych pionowo i zbrojonych podłużnie – przy przyjęciu otuliny najbardziej niekorzystnej (najmniejszej).



Wpływ zastosowania zbrojenia podłużnego na nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$, bez lub z niewielkimi (M) naprężeniami ściskającymi w prasie

- Seria Zasadnicza I
- $f_{c,cube} = 23,8 \text{ MPa}$
- $\sigma_c = 0 \text{ MPa}$ – średnica 8 mm
- $\sigma_c \approx 7\% f_{c,cube}$ – średnica 10 i 12 mm
- Seria Zasadnicza V
- $f_{c,cube} = 23,1 \text{ MPa}$
- $\sigma_c = 0 \text{ MPa}$ – średnica 8, 10 i 12 mm

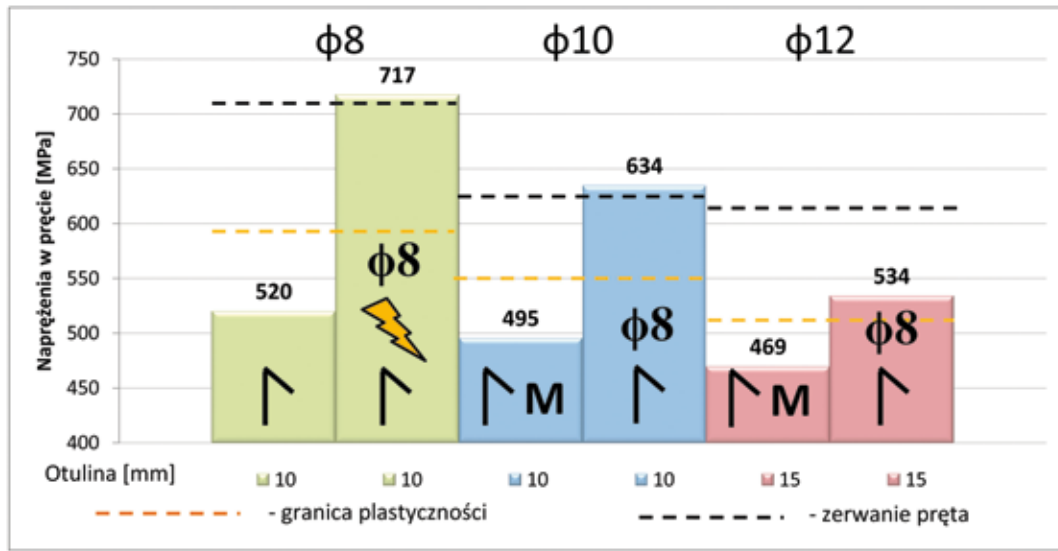


Wyniki badań modeli, obciążonych siłą powodującą napężenie pionowe w elemencie wynoszące około 0% lub 7% $f_{c,cube}$ w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych w elementach bez nacisku prasy, w których zastosowano zbrojenie podłużne w postaci dwóch prętów prostych dla strzemion o średnicy 8, 10 i 12 mm przy przyjęciu najmniejszej grubości otulin przedstawiono na rys. 52.

Zastosowanie zbrojenia podłużnego w postaci prętów prostych o średnicy równej strzemionom skutkowało wyraźnym wzrostem nośności zakotwień. Ich użycie zabezpieczyło elementy przed pęknięciem w płaszczyźnie haka (rys. 29).

Rys. 53.

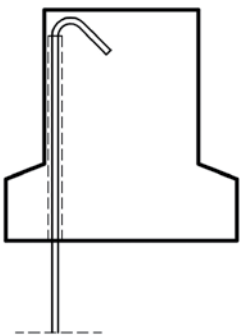
Wyniki badań modeli zbrojonych strzemieniem o haku ostrym 135°, poddanych działaniu niewielkich sił ściskających (0% lub 7% $f_{c,cube}(M)$) w prasie w porównaniu do elementów nieobciążonych i przy przyjęciu większej średnicy zagięcia strzemienia 8ø – dla otuliny najbardziej niekorzystnej (najmniejszej)



– zerwanie się pręta.

Wpływ średnicy zagięć strzemion na nośność zakotwień w elementach 6-dniowych z betonu o planowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 23$ MPa, bez lub z niewielkim ściskaniem w prasie (M)

- Seria Zasadnicza I
- $f_{c,cube} = 23,8$ MPa
- Średnica zagięć pręta 4ø
- $\sigma_c = 0$ MPa – średnica 8 mm
- $\sigma_c \approx 7\% f_{c,cube}$ – średnica 10 i 12 mm
- Seria Zasadnicza IV
- $f_{c,cube} = 24,1$ MPa
- Średnica zagięć pręta 8ø
- $\sigma_c = 0$ MPa – średnica 8, 10 i 12 mm

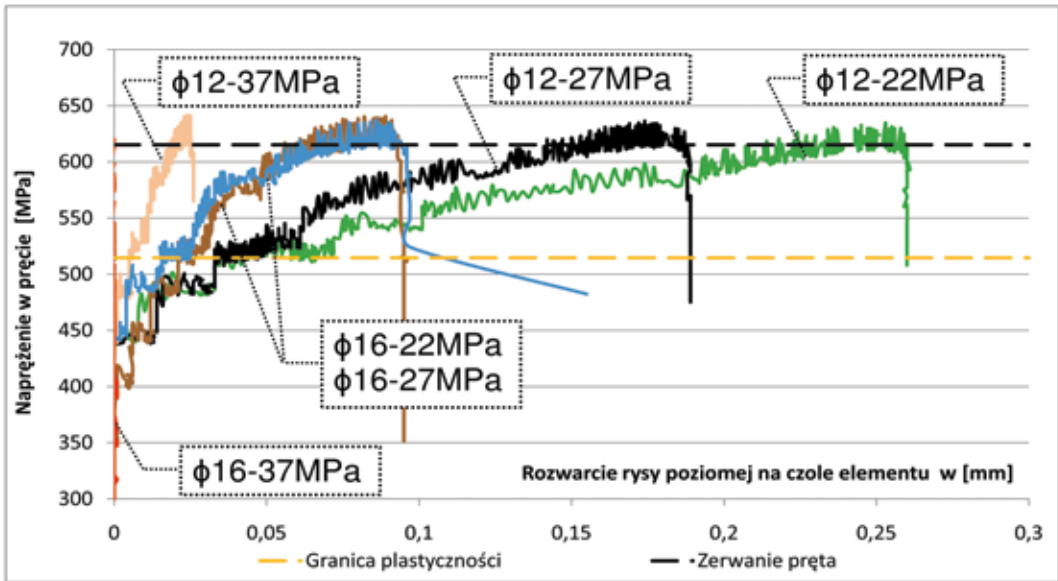


Wyniki badań modeli obciążonych siłą powodującą naprężenie pionowe w elemencie wynoszące 0% lub $\approx 7\% f_{c,cube}$ w porównaniu do nośności zakotwień otrzymanych w elementach bez nacisku prasy, w których strzemiona gięto większą średnicą, tj. zamiast minimalnej 4ø przyjęto 8ø, dla prętów o średnicy 8, 10 i 12 mm, dla najmniejszej grubości otulin, przedstawiono na rys. 53.

Zmiana średnicy zagięcia pręta na większą w każdym przypadku skutkowałą wzrostem nośności zakotwienia. Zmniejszono w ten sposób naprężenia rozłupujące element od klina powstałego pod hakiem strzemienia w trakcie wyrywania pręta z modelu.

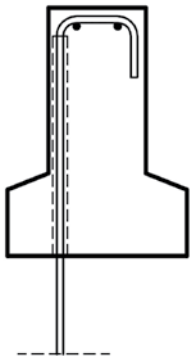
Rys. 54.

Wyniki badań zarysowania poziomego modeli zbrojonych strzemieniem o haku poza normowym, gdzie zastosowano różną średnicę pręta podłużnego wewnątrz pierwszego zagięcia strzemienia, tj. 12 lub 16 mm oraz różną wytrzymałość betonu.



Wpływ średnicy pręta podłużnego i wytrzymałości betonu na zarysowanie modelu w obrębie haka strzemienia, w elementach 6-dniowych bez ściskania w prasie

- Seria Zasadnicza VIII
- $f_{c,cube} = 21,9 \text{ MPa}$
- Seria Zasadnicza IX
- $f_{c,cube} = 26,8 \text{ MPa}$
- Seria Zasadnicza XI
- $f_{c,cube} = 36,6 \text{ MPa}$

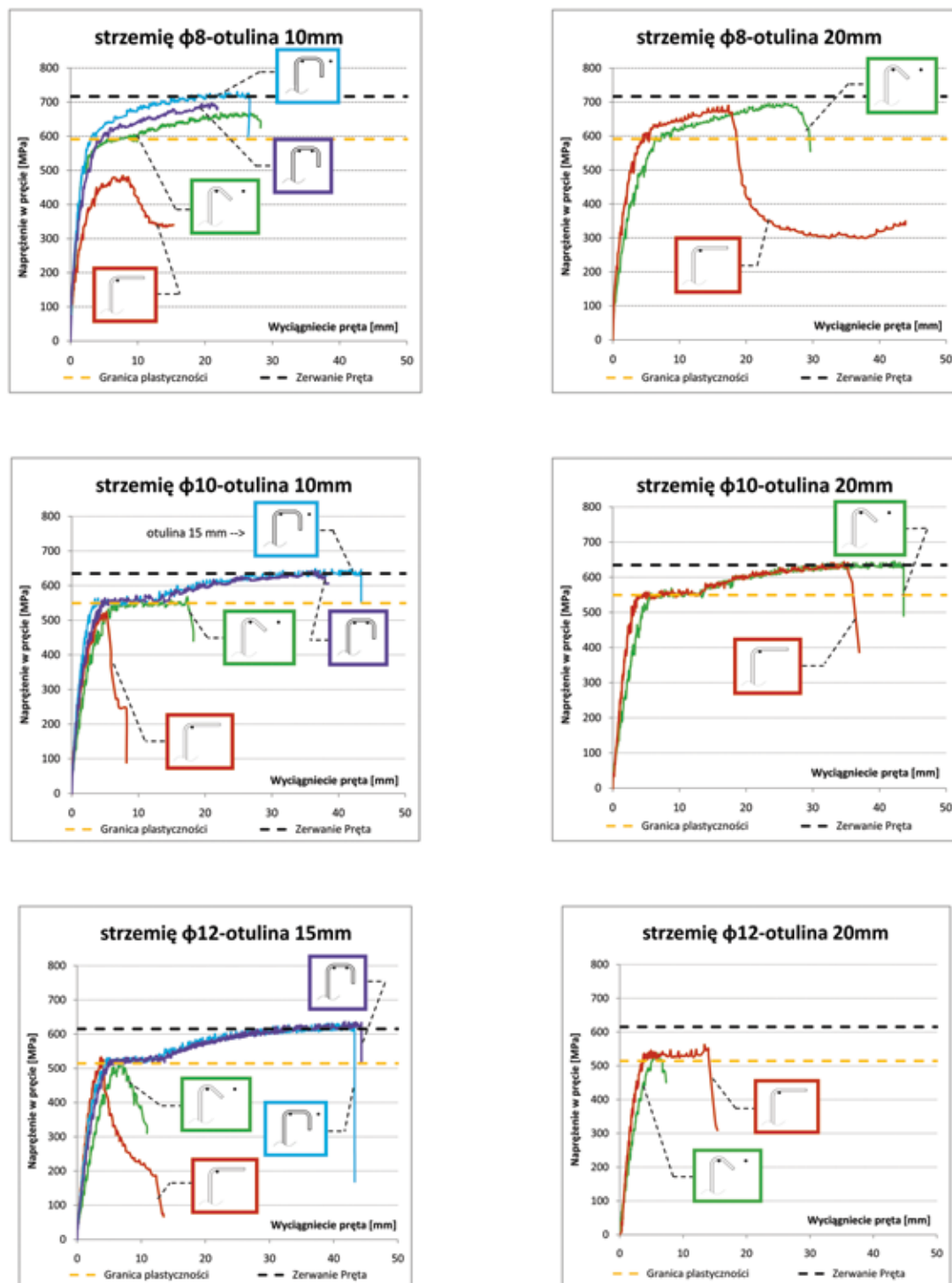


Porównanie zmiany sumy rozwartości rys poziomych na czole elementów, w obrębie haka pręta poprzecznego, w trakcie wrywania zakotwionego strzemienia przedstawiono na rys. 54. Modele wykonano z betonów o różnej wytrzymałości tj. $f_{c,cube} = 21,9, 26,8$ i $36,6 \text{ MPa}$, przy przyjęciu średnicy pręta podłużnego 12 lub 16 mm wewnątrz pierwszego zagięcia haka strzemienia. We wszystkich analizowanych modelach grubość otulenia zbrojenia była jednakowa i wynosiła 20 mm. Pręt podłużny wewnątrz drugiego zagięcia strzemienia nie ulegał zmianie i jego średnica wynosiła 12 mm.

Zwiększanie grubości pręta podłużnego zlokalizowanego wewnątrz haka strzemienia wpływało korzystnie na zarysowanie poziome na czole modelu powodując jego zmniejszenie. Podobny efekt uzyskano zwiększając wytrzymałość betonu.

Rys. 55.

Wpływ różnych haków strzemion na otrzymane wartości przemieszczeń prętów.



Wysuw obciążanego pręta strzemienia z elementu na podstawie modeli 6-dniowych o planowanej wytrzymałości betonu $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$, bez ściskania w prasie, z zastosowaniem zbrojenia podłużnego

- Seria Zasadnicza V
- $f_{c,cube} = 23,1 \text{ MPa}$
- Hak ostry 135° wg rys. 12b
- Seria Zasadnicza XII
- $f_{c,cube} = 25,0 \text{ MPa}$
- Hak prosty 90° wg rys. 10a
- Seria Zasadnicza XIII
- $f_{c,cube} = 25,0 \text{ MPa}$
- Hak poza normowy wg rys. 11g, i

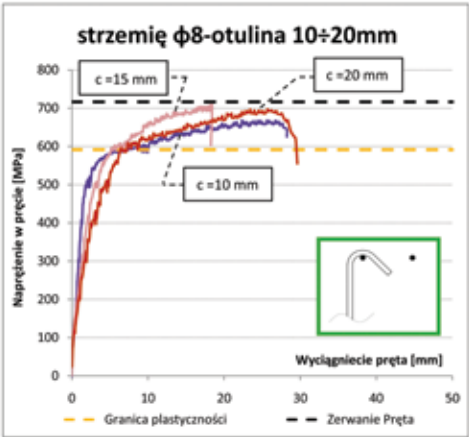
Porównanie wyników naprężeń rozciągających w strzemionach, w stosunku do ich wysuwu z elementów, dla rozwiązań normowych haka jak i dla typu poza normowego zamieszczono na rys. 55.

Największe wysunięcia pręta mierzone przy naprężeniu w strzemieniu równym i mniejszym od granicy plastyczności stali, wystąpiły dla zakotwienia zbrojenia hakiem ostrym (wyjątek stanowi strzemię o średnicy 8 mm przy otulinie 10 mm, gdzie doszło do nagłego zniszczenia zakotwienia w wyniku wyłamania otuliny betonu poprzez prostujący się hak prosty 90° pręta). W tym poziomie naprężeń najmniejsze wysunięcia prętów zaobserwowano przy zakotwieniu strzemion hakiem poza normowym wg rys. 11i. Przy dalszym (ponad naprężenia uplastyczniające) zwiększaniu siły wrywającej pręt z modelu, największe nośności i zarazem najbardziej ekstremalne wysunięcia prętów (wykorzystując „płynięcie stali” oraz jej wzmocnienie) wystąpiły dla zakotwienia poza normowego wg rys. 11i, a w dalszej kolejności dla modeli wg rys. 11g.

Rozwiązanie wg rys. 11i sprawdziło się przy wszystkich stosowanych grubościach otuliny (w szczególności 10 mm), jak również wszystkich analizowanych średnicach prętów, w sytuacjach kiedy rozwiązania normowe nie pozwoliły na wykorzystanie pełnej nośności strzemienia.

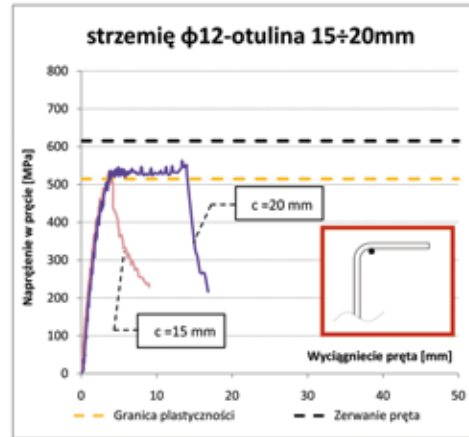
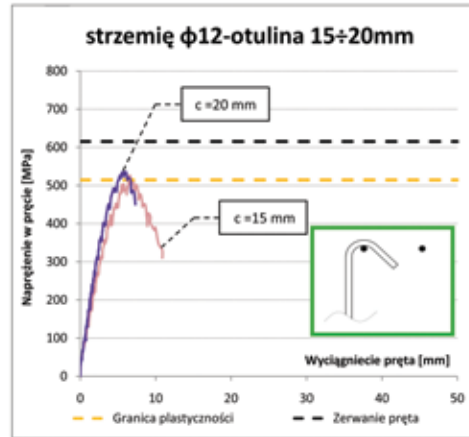
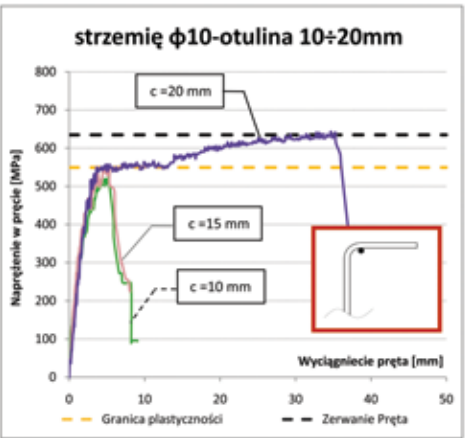
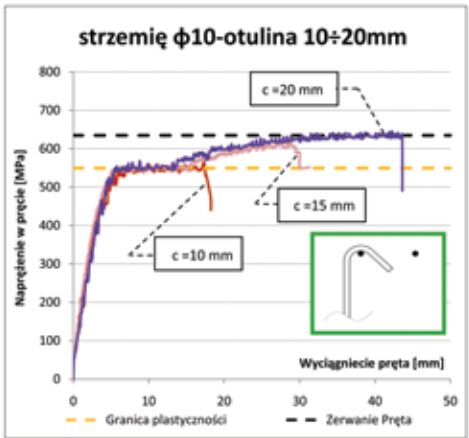
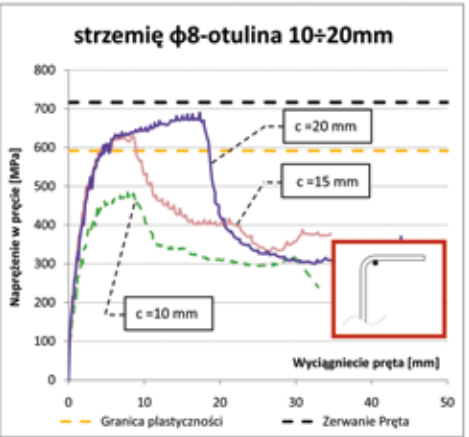
Rys. 56.

Wpływ otuliny na przemieszczenie pręta dla haka ostrego 135° strzemienia.



Rys. 57.

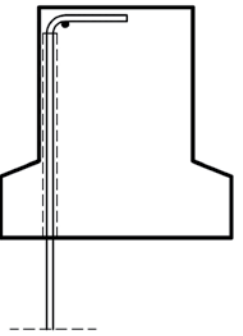
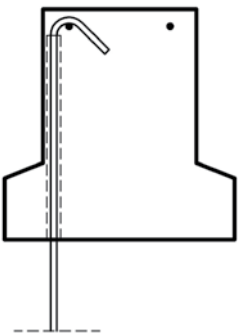
Wpływ różnych haków strzemion na otrzymane wartości przemieszczeń prętów.



Wysuw obciążanego pręta strzemienia kotwionego hakiem ostrym 135° i prostym 90° z elementu na podstawie modeli 6-dniowych o planowanej wytrzymałości betonu $f_{c,cube} = 23 \text{ MPa}$, bez ściskania w prasie

➤ Seria Zasadnicza V
➤ $f_{c,cube} = 23,1 \text{ MPa}$

➤ Seria Zasadnicza XII
➤ $f_{c,cube} = 25,0 \text{ MPa}$



Na rys. 56 zestawiono wyniki wpływu grubości otuliny o wartościach 10, 15 i 20 mm na wysunięcie wrywanego z betonu pręta strzemienia o zakotwieniu hakiem ostrym 135°. Wraz ze wzrostem grubości otulenia zbrojenia poprzecznego zaobserwowano wzrost nośności zakotwień typu haka ostrego 135°. Najbardziej wpływ ten jest zauważalny dla strzemienia o średnicy 10 mm.

Na rys. 57 zestawiono wyniki wpływu grubości otuliny o wartościach 10, 15 i 20 mm na wysunięcie wrywanego z betonu pręta strzemienia o zakotwieniu hakiem prostym 90°. Analogicznie jak to miało miejsce przy kotwieniu strzemion hakiem ostrym, wzrost grubości otulenia również przy zastosowaniu haka prostego skutkował podwyższeniem nośności zakotwienia oraz w większym stopniu wykorzystaniem dużej ciągliwości stali. Stosowanie minimalnych grubości otulenia prętów zbrojeniowych w większości przypadków kończy się nie osiągnięciem granicy plastyczności zbrojenia. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż haki proste są bardziej „wrażliwe” na małe grubości otulenia betonem, co objawia się bardzo szybkim zniszczeniem elementu poprzez wyłamanie otuliny przez prostujący się zagięty hak strzemienia.

Badanie belek żelbetowych na ścinanie

Po zakończeniu badań na elementach drobnowymiarowych rozpoczęto projektowanie dwóch pełnowymiarowych, jednoprzęsłowych 4-metrowych belek żelbetowych (rys. 58), celem sprawdzenia skuteczności kotwienia zbrojenia poprzecznego za pomocą haka poza normowego, który wykazywał najlepsze właściwości kotwiące spośród wszystkich przebadanych rozwiązań wg rys. 11i.

Zbrojenie poprzeczne modeli stanowiły strzemiona o średnicy 8 i 10 mm, prostopadłe do osi belki. Podłużny rozstaw strzemion obu średnic dobrano w taki sposób, aby uzyskać podobne nośności na ścinanie odcinków przypodporowych (z ~25% zapasem nośności na zginanie). Strzemiona o średnicy 8 mm na odcinkach podporowych rozmieszczano co 20 cm, natomiast o średnicy 10 mm co 25 cm. Na środkowym odcinku pomiędzy miejscami przyłożenia sił skupionych strzemiona rozmieszczono co 30 cm. Na wspornikach, ze względu na występowanie dużych sił docisku w strefie zakotwienia mechanicznego dolnych prętów podłużnych, strzemiona rozmieszczono co 7,5 cm. Zakotwienie (haki) strzemion każdej średnicy wykonano w dwóch wariantach, przy czym rozwiązanie z dłuższym hakiem rozmieszczono na ok. 2/3 belki. Otulina wszystkich prętów zbrojenia podłużnego wynosiła $c_{nom} = 25$ mm, a zbrojenia poprzecznego $c_{nom} = 15$ mm i we wszystkich belkach była taka sama.

Program badania wszystkich modeli obejmował zniszczenie dwóch odcinków, tj. strefy ścinania zlokalizowanej przy każdej z podpór. Podczas obciążania elementu, po zniszczeniu pierwszego odcinka ścinania przy jednej z podpór, następowało jej wzmocnienie (rys. 59) kształtownikami stalowymi w postaci ceowników połączonych ze sobą za pomocą śrub, po czym następowało badanie drugiego odcinka ścinania przy drugiej podporze.

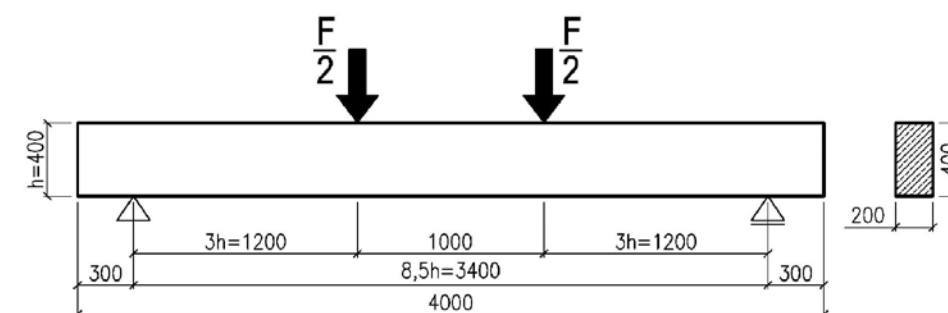
Przyjęto obciążenie przęsa belek dwoma siłami skupionymi według schematu przedstawionego na rys. 60.

Wyniki tego etapu badań zostaną przedstawione w dalszych publikacjach.

Rysunek konstrukcyjny zbrojenia modeli badawczych.



a) i b) montaż kształtowników i śrub, c) model podczas badania drugiego odcinka ścinania.



Podsumowanie

Podczas prowadzenia badań wrywania strzemion z betonu uwzględniono wpływ na nośność zakotwień szeregu czynników. Były to::

- średnica strzemienia,
- kształt haka pręta i średnica jego zagięcia,
- ciągliwość stali i jej wytrzymałość na rozciąganie,
- grubość otulenia zbrojenia i wytrzymałość betonu,
- obecność, ilość i średnica zbrojenia podłużnego,
- wartość naprężeń ściskających prostopadłych do płaszczyzny zagięcia haka.

Oddziaływanie powyższych czynników na uzyskiwane wyniki zostało udokumentowane w niniejszych badaniach. Jest jednak szereg innych czynników mających istotny wpływ na nośność zakotwienia, których nie analizowano w niniejszych badaniach. Należą do nich m.in.:

- kierunek betonowania,
- powierzchnia (skorodowanie, powłoki) i geometria pręta (uźebrowanie, itp.),
- zakotwienie strzemion w strefie rozciągania, co ma miejsce w belkach ciągłych przy wewnętrznych podporach.

Zniszczenie elementów zbrojonych podłużnie, w których nie osiągnięto pełnej nośności strzemion, zarówno w elementach ściskanych, jak i bez obciążenia prostopadłego do płaszczyzny jego zagięcia, w których strzemiona kotwione były hakiem prostym 90° , ostrym 135° , jak również w sposób poza normowy, gdzie koniec pręta posiadał minimalną otulinę (rys. 11g), następowało najczęściej wskutek poślizgu pręta w zakotwieniu, a w dalszej kolejności wskutek wyłamania otuliny betonowej poprzez prostujący się hak.

Inny sposób zniszczenia zaobserwowano w elementach zbrojonych podłużnie i nie ściskanych w prasie, w których strzemiona kotwiono w sposób poza normowy. Przy zastosowaniu betonu o niskiej wytrzymałości, tj. $f_{c,cube} \leq 16$ MPa, dochodziło najczęściej do pęknięcia elementu w płaszczyźnie zagiętego pręta strzemienia i jego wysuwaniu się z zakotwienia wraz ze znaczną degradacją modelu lub gwałtownym rozpadnięciem się próbki.

Zastosowanie naprężeń ściskających (zarówno o małej jak i dużej wartości) opóźniało pojawienie się zarysowań elementu w obrębie haka strzemienia, jak również przeciwdziało wyłamaniu otuliny (pomimo poślizgu pręta w betonie) skutkującemu utratą nośności zakotwienia.

Spośród przebadanych rozwiązań (rys. 11i), w których kotwiono zbrojenie poprzeczne w sposób typowy dla belek, tj. przy zastosowaniu dwóch prętów podłużnych oraz przy zakotwieniu końca strzemienia głęboko wewnątrz elementu, rozwiązanie z wykorzystaniem haka o kształcie poza normowym pozwoliło na przeniesienie największych obciążeń dla każdej przyjętej grubości otuliny z zakresu od 10 do 20 mm, dla każdej średnicy pręta strzemienia równej 8, 10 lub 12 mm, jak również niezależnie od klasy betonu.

Przy niskich wytrzymałościach betonu ($f_{c,cube} \leq 16$ MPa), w elementach nie ściskanych w prasie, w przypadku strzemion o hakach normowych 90° (rys. 10a) i 135° (rys. 12b), względnie haku poza normowym (rys. 11g), zakotwienie było na tyle słabe, iż nie można było osiągnąć granicy plastyczności pręta. Przyjęcie większej szerokości elementu próbnego i umieszczenie zbrojenia podłużnego w sposób typowy dla belek przy kotwieniu strzemion hakiem poza normowym (wg rys. 11i), zapewniło pełne zakotwienie strzemion o średnicy 8 i 10 mm, czego efektem było zerwanie prętów. Dla strzemion o średnicy 12 mm powyższe zakotwienie (rys. 11i) pozwoliło osiągnąć siły zbliżone do całkowitej nośności pręta.

Stosując beton o większej wytrzymałości wynoszącej $f_{c,cube} \approx 23$ MPa, w elementach nie ściskanych w prasie, zalecane przepisami [2, 3] rozwiązania zakotwień strzemion hakiem prostym lub ostrym, w analizowanych przypadkach nie pozwoliło wykorzystać rezerwy nośności tkwiącej w stali. Wyjątkiem okazały się modele zbrojone strzemieniem o haku 135° , o średnicy 8 mm dla dowolnej wartości otuliny oraz o średnicy 10 mm dla $c_{min} = 20$ mm. Rozwiązania zakotwienia strzemion w sposób poza normowy (wg rys. 11i, g) w każdym przypadku pozwalały na uzyskanie pełnej nośności strzemion.

Dla betonu o wysokiej wytrzymałości $f_{c,cube} \geq 37$ MPa, w elementach nie ściskanych w prasie, uzyskano zerwanie pręta dla wszystkich przebadanych rozwiązań zakotwień zbrojenia poprzecznego.

Zwraca się uwagę, iż stosowanie większych promieni zagięć strzemion ($\geq 4\phi$), grubszych otulin, naprężeń ściskających prostopadłych do płaszczyzny zagięcia strzemion (zarówno niskich jak i bardzo wysokich $\sigma_c \approx 85\%$), wyższych wytrzymałości betonu, większych średnic zbrojenia podłużnego, skutkowało polepszeniem skuteczności zakotwienia strzemienia w betonie i zmniejszeniem zarysowań w obrębie haka pręta.

Należy pamiętać, iż w wypadku kotwienia strzemion w sposób zarówno normowy (rys. 4a, b), jak i poza normowy (rys. 4c), należy zawsze stosować zbrojenie podłużne umieszczone w pobliżu każdego z zagięć pręta, celem zabezpieczenia elementu przed rozłupaniem w płaszczyźnie haka.

Postulat

W przypadku wykonywania strzemion ze stali klasy B lub C, o wytrzymałości $f_{yk} \geq 500$ MPa, aby w pełni wykorzystać ich nośność i zapewnić możliwość ich zniszczenia jedynie poprzez zerwanie się prętów, należy, kotwiąc w strefie nie rozciąganej elementu:

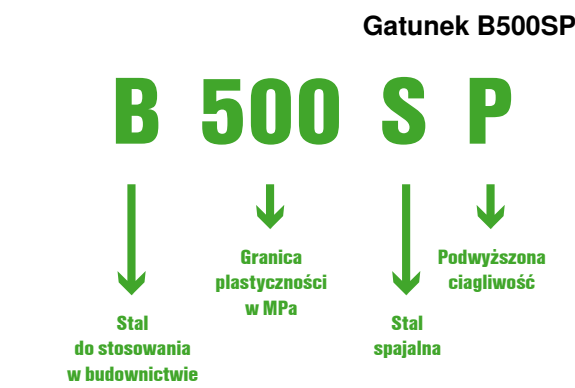
- dla strzemion o średnicach 8, 10 i 12 mm, zakotwionych hakiem wykonanym wg zaleceń normy [2, 3] (rys. 4a, b), stosować jednocześnie betony klasy co najmniej C30/37;
- w przypadku zastosowania betonu klasy niższej niż C30/37 oraz strzemion o średnicy 8 i 10 mm należy raczej stosować rozwiązanie zakotwienia hakiem poza normowym (wg rys. 4c i rys. 11i).

Piśmiennictwo

- [1] Jasiński R., Kupczyk R., Starosolski W., Wieczorek M.: Badania belek żelbetowych zbrojonych na ścinanie stalą o zróżnicowanej ciągliwości. 53-cia Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Krynica 2007, tom II, s. 79-86.
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008 – Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [3] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. Grudzień 2002.

Stal EPSTAL - właściwości

EPSTAL - stal zbrojeniowa o wysokiej ciągliwości
Klasa C wg Eurokodu 2
Klasa A-IIIN wg PN-B-03264
Dobra spajalność



Oznaczenia

Oznaczenie w hutnictwie	Oznaczenie w budownictwie	Jednostka	Opis
R _e	f _{yk}	[MPa]	Granica plastyczności
R _m	f _{tk}	[MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie
R _m / R _e	f _{tk} / f _{yk}	-	Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności
A ₅	-	[%]	Wydłużenie procentowe
A _{gt}	ε _{uk}	[%]	Wydłużenie procentowe przy maksymalnej sile

Własności wytrzymałościowe - próba rozciągania

R _e ^a [MPa]		R _m /R _e [-]		A ₅ [%]	A _{gt} [%]
min.	max	min.	max	min.	min.
500	625	1,15	1,35	16	8
^a Za granicę plastyczności R _e uważa się górną granicę plastyczności R _{eH}					

Skład chemiczny

Analiza	C	Mn	Si	P	S	Cu	Na	C _{eq} max [%]
	Maksymalna zawartość w %							
Wytopowa	0,22	1,60	0,55	0,05	0,05	0,80	0,01	0,50
Wyrobu	0,24	1,65	0,60	0,06	0,0	0,85	0,01	0,52
^a Dopuszcza się przekroczenie podanych wartości liczbowych, jeśli na każde zwiększenie o 0,001% N zawartość maksymalna P zostanie zmniejszona o 0,005%; jednakże zawartość N według analizy wytopowej nie powinna przekraczać 0,015%.								
Równoważnik węgla oblicza się ze wzoru: C _{eq} = C + Mn/6 + (Cr+V+Mo)/5 + (Cu+Ni)/15								

Stal EPSTAL - tablice do projektowania

Wymiary nominalne i masa

Parametry wytrzymałościowe i ciągliwości

Średnica pręta [mm]	Nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego [mm²]	Masa nominalna* [kg/m]
8 mm	50,30	0,395
10 mm	78,50	0.617
12 mm	113,00	0.888
16 mm	201,00	1.580
20 mm	314,00	2.470
25 mm	491,00	3.850
32 mm	804,00	6.310

* Masa obliczona na podstawie ciężaru objętościowego stali 7850 kg/m³

Parametry	Wartość
f _{yk}	≥ 500 [MPa]
f _{yd}	≥ 420 [MPa]
f _{tk}	≥ 575 [MPa]
f _{tk} /f _{yk}	1.15 ÷ 1.35 [-]
u _k	≥ 8 [%]
C _{eq}	≤ max 0.50 [%]

Przekrój zbrojenia w cm²/m w zależności od rozstawu prętów

Średnica [mm]	Powierzchnia przekroju poprzecznego zbrojenia w cm²/m w zależności od liczby prętów				
	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
8 mm	5.03	3.35	2.51	2.01	1.68
10 mm	7.85	5.24	3.93	3.14	2.62
12 mm	11.13	7.54	5.65	4.52	3.77
16 mm	20.11	13.40	10.05	8.04	6.70
20 mm	31.42	20.94	15.71	12.57	10.47
25 mm	49.09	32.72	24.54	19.63	16.36
32 mm	80.42	53.62	40.21	32.17	26.81

Przekrój zbrojenia w cm² w zależności od ilości prętów

Średnica [mm]	Powierzchnia przekroju poprzecznego zbrojenia w cm²/m w zależności od liczby prętów									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8 mm	0.50	1.01	1.51	2.01	2.51	3.02	3.52	4.02	4.52	5.03
10 mm	0.79	1.57	2.36	3.14	3.93	4.71	5.50	6.28	7.07	7.85
12 mm	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31
16 mm	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.10	20.11
20 mm	3.14	6.28	9.42	12.57	15.71	18.85	21.99	25.13	28.27	31.42
25 mm	4.91	9.82	14.73	19.63	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09
32 mm	8.04	16.08	24.13	32.17	40.21	48.25	56.30	64.34	72.38	80.42

www.cpjs.pl

Centrum Promocji Jakości Stali

Ul. Koszykowa 54

00-675 Warszawa

Tel. +48 22 630 83 75

Fax +48 22 625 50 49

E-mail: biuro@cpjs.pl