

Roman Kinash*

BADANIA ZMĘCZENIOWE ZGINANYCH BELEK ŻELBETOWYCH CZĘŚCIOWO SPRĘŻONYCH**

1. Wstęp

Rozwój konstrukcji sprężonych w Polsce w latach 50. i na początku lat 60. XX wieku następował prawie równocześnie z rozwojem tych konstrukcji w Europie i na świecie. Strunobeton nadaje się szczególnie do stosowania w prefabrykacji masowej elementów przykryć dachowych i stropowych (płyty żebrowe i wielokanałowe oraz rygle), podkładów kolejowych, żerdzi napowietrznych linii elektroenergetycznych, belek mostowych o rozpiętości do 21,0 m oraz rur ciśnieniowych [1]. Strunobetonowe i częściowo sprężone żerdzie z betonu wirowanego zostały wprowadzone do polskiego budownictwa elektroenergetycznego dopiero na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku [8, 9].

W ciągu wielu lat projektowanie żelbetowych konstrukcji sprężonych zorientowane było na pełne (*fully*), wstępne sprężenie zbrojenia, dla którego w betonie nie powstaje naprężenie rozciągające od obciążenia użytkowego. Jedną z podstawowych wad konstrukcji sprężonych „całkowicie” jest brak możliwości odpowiedniego rozmieszczenia zbrojenia wstępnie sprężającego dobranego do odpowiednich wykresów momentów zginających.

Konstrukcje, w których zastosowano jednocześnie zbrojenie zwykłe i wstępnie sprężające w praktyce niektórych krajów [2] zakwalifikowano do tzw. konstrukcji żelbetowych z „mieszanym” zbrojeniem, albo też zdefiniowano je jako konstrukcje częściowo wstępnie sprężone (*Partial Prestressing*) [3].

Efekt ekonomiczny konstrukcji żelbetowych z „mieszanym” zbrojeniem osiąga się w wyniku takich czynników jak: zmniejszenie ilości zbrojenia wskutek kształtowania zbrojenia dobranego do wykresu momentów zginających; zmniejszenie działania obciążenia na wspor-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej WGiG AGH nr 11.11.100.588

niki toru naciągowego; zmniejszenie wydatków na zakotwienie zbrojenia sprężającego, na sprężenie liczby prętów oraz zmniejszenie dla tego wydatku energii.

Skuteczność zbrojenia mieszanego dla żelbetowych konstrukcji różnego rodzaju pokazana w pracach wielu badaczy w Polsce, Rosji, Ukrainie, Uzbekistanie, jak również w Wielkiej Brytanii, Kanadzie czy Stanach Zjednoczonych [2, 5, 6, 8, 9].

Na możliwość zastosowania mieszanego zbrojenia konstrukcji żelbetowych badacze zwrócili uwagę po raz pierwszy w czterdziestych latach XX w. Abeles P.W. i inni, Wielka Brytania [2], kiedy to zrealizowano ciekawe badania zginanych elementów konstrukcji mostowych. W Ukrainie pierwsze doświadczenia z konstrukcjami z mieszanym zbrojeniem uzyskano w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Politechnice Lwowskiej z badań prowadzonych pod kierownictwem doc. dr inż. I.I. Gradiuka [6]. Później podobne badania przeprowadzono w Naukowo-Badawczym Instytucie Żelbetu w Moskwie, w naukowo-badawczych organizacjach Rostowa-nad-Donem, Taszkentu, Nowosybirsk oraz Równego w Ukrainie [2].

W niniejszym artykule podano wyniki badań wpływu parametrów obciążenia zmęczeniowego (poziomu obciążenia $\gamma = \frac{M_{\max}}{M_u}$, współczynnika asymetrii cyklu $\rho = \frac{M_{\min}}{M_{\max}}$ i liczby cykli) na wytrzymałość żelbetowych belek zginanych ze zbrojeniem mieszanym — częściowo sprężającym.

2. Materiały oraz konstrukcja belek doświadczalnych

Zbrojenie. System wstępnie sprężającego zbrojenia tworzyły siedmiodrutowe liny klasy K-7 $\varnothing 12$ i 15 mm [7]. Parametry wytrzymałościowe lin podano w tabeli 1. Pręty zbrojeniowe $\varnothing 12$ mm klasy A-II wykorzystywano jako zbrojenie zwykłe dla belek ze zbrojeniem mieszanym. Parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych wyznaczono na podstawie badań eksperymentalnych i podane są w tabeli 2.

Kruszywo — granitowe o uziarnieniu 5÷25 mm.

Piasek — kwarcowy frakcji 0÷2,0 mm.

Dla porównania wyników badań wyprodukowano belki „całkowicie” sprężone (*BS*) i belki ze częściowo sprężone (ze zbrojeniem „mieszanym” — *BSM*) o przekroju prostokątnym i wymiarach 12 × 24 cm, z rozpiętością obliczeniową 180 cm przy ogólnej długości 210 cm (rys. 2). Belki typu *BS* zbrojone były dwoma siedmiodrutowymi linami $\varnothing 12$ mm. W belkach ze zbrojeniem mieszanym 22% zbrojenia sprężającego zastąpiono zbrojeniem zwykłym. Belki typu *BSM* zbrojone były jedną siedmiodrutową liną $\varnothing 15$ mm (zbrojenie sprężające) i dwoma prętami $\varnothing 12$ mm klasy A-II (zbrojenie zwykłe). Zbrojenie zwykłe było zlokalizowane obok podpór, z zabezpieczeniem jego zakotwienia (rys. 1). Wytrzymałość belek ze zbrojeniem „mieszanym” była taka sama, jak i belek ze zbrojeniem „całkowicie” sprężonym.

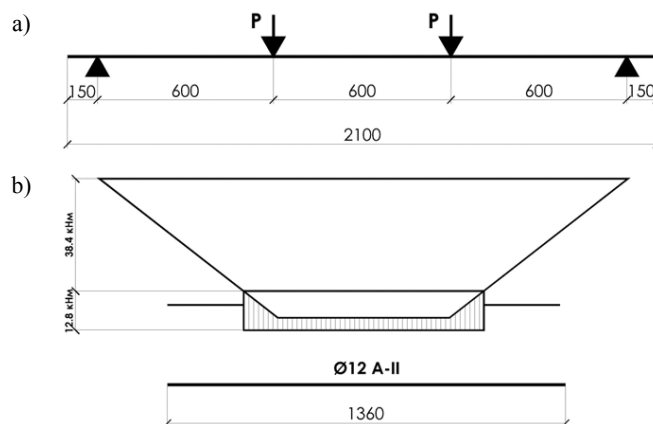
TABELA 1
Parametry wytrzymałościowe cięgna K-7

| Lp. | Średnica, mm | Pole przekroju, cm ² | | σ _{0,01} , MPa | | σ _{0,2} , MPa | | σ _B , MPa | | E _s × 10 ⁵ , MPa | |
|-----|-----------------|---------------------------------|---------|-------------------------|---------|------------------------|---------|----------------------|---------|--|---------|
| | | próbki | średnia | próbki | średnia | próbki | średnia | próbki | średnia | próbki | średnia |
| 1 | 15 | 1,427 | | 760 | | 1260 | | 1660 | | 1,71 | |
| 2 | 15 | 1,430 | 1,427 | 758 | 742 | 1230 | 1218 | 1660 | 1660 | 1,71 | 1,71 |
| 3 | 15 | 1,425 | | 708 | | 1165 | | 1650 | | 1,70 | |
| 4 | 12 | 0,91 | | 702 | | 1280 | | 1670 | | 1,80 | |
| 5 | 12 | 0,913 | 0,91 | 750 | 731 | 1360 | 1320 | 1750 | 1700 | 1,81 | 1,80 |
| 6 | 12 | 0,907 | | 740 | | 1320 | | 1680 | | 1,79 | |

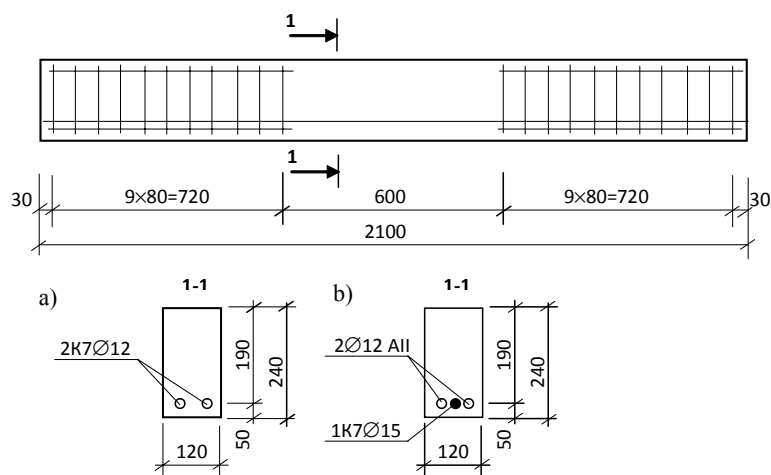
TABELA 2
Parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych klasy A-II

| Numer próbki | Średnica i klasa zbrojenia | Pole przekroju, cm ² | | σ _{ys} , MPa | | σ _B , MPa | | E _s × 10 ⁵ , MPa | |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|---------|-----------------------|---------|----------------------|---------|--|---------|
| | | próbki | średnia | próbki | średnia | próbki | średnia | próbki | średnia |
| 1 | 12 A-II | 0,95 | | 346 | | 585 | | 1,97 | |
| 2 | 12 A-II | 1,05 | 1,00 | 341 | 343 | 565 | 570 | 2,05 | 2,02 |
| 3 | 12 A-II | 1,00 | | 342 | | 560 | | 2,704 | |

Dla zabezpieczenia przed zniszczeniem pochyłych przekrojów belek w skrajnych strefach przy podporach (1/3 przęsła) przewidziano zbrojenie poprzeczne, natomiast zbrojenia tego nie zastosowano w strefę „czystego” zginania (rys. 2). Początkowe napięcie lin $\varnothing 12$ mm wynosiło $\sigma_p = 1020$ MPa (belki typu *BS*), a lin $\varnothing 15$ mm $\sigma_p = 995$ MPa (belki typu *BSM*).



Rys. 1. Schemat obciążenia (a) oraz rozmieszczenia zbrojenia zwykłego (b) w belkach doświadczalnych



Rys. 2. Konstrukcja belek eksperymentalnych:
a) w pełni sprężonych; b) ze zbrojeniem mieszanym (częściowo sprężającym)

Do czasu rozpoczęcia badań eksperymentalnych kontrolowane naprężenie we wszystkich belkach było jednakowe i wynosiło $\sigma_{02} = 926,5$ MPa, a średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 47 MPa. Podstawowe parametry belek doświadczalnych podano w tabeli 3.

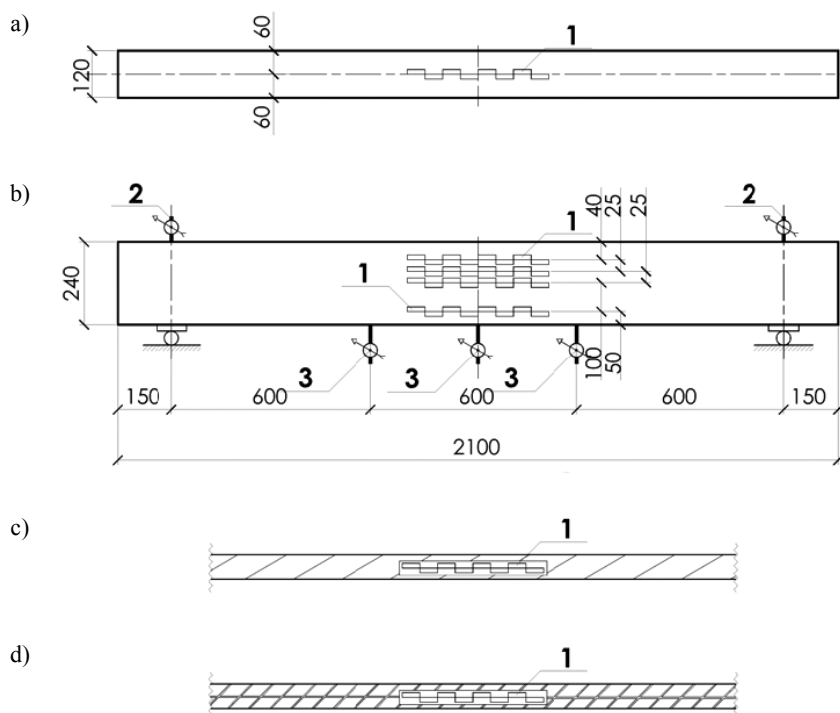
TABELA 3
Podstawowe parametry belek doświadczalnych

| Typ belki | Wymiary przekroju poprzecznego, mm | | | Zbrojenie sprężające | | | | | Zbrojenie zwykłe | | | Razem μ_s , % |
|-----------|------------------------------------|-----|-------|----------------------------|---------------------|---------------------|----------------|-------------------------|------------------|-------------|------|-------------------|
| | B | h | h_0 | A_{ps} , cm ² | σ_{ps} , MPa | σ_{o2} , MPa | μ_{ps} , % | A_s , cm ² | σ_y , MPa | μ_s , % | | |
| BS-1 | 120 | 240 | 190 | 1,82 | 1020 | 926,5 | 0,8 | - | - | - | 0,8 | |
| BS-2 | | | | 1,82 | 1020 | 919,0 | 0,8 | - | - | - | 0,8 | |
| BSM-1 | | | | 1,427 | 995 | 928,5 | 0,63 | 2,0 | 343 | 0,88 | 1,51 | |
| BSM-2 | | | | 1,427 | 995 | 928,5 | 0,63 | 2,0 | 343 | 0,88 | 1,51 | |

3. Metodyka wykonania badań

W chwili sprężania belek mierzono ich krótkotrwałe wygięcia, odkształcenia betonu i zbrojenia. Przy badaniach wzrostu wygięć oraz przebiegu w czasie strat siły sprężającej zbrojenia wskutek pełzania i skurczu betonu, belki po przekazaniu sprężenia badano w pomieszczeniu laboratorium w ciągu 122÷195 dni, a potem były poddane badaniom eksperymentalnym na zginanie. Dwie belki typu *BS* i *BSM* poddawano krótkotrwałym obciążeniami statycznym. Stąd otrzymano wartość, którą wykorzystywano do rejestrowania początku zakrywania oraz zniszczenia próbek. Na podstawie tych parametrów przyjmowano parametry obciążenia zmęczeniowego (γ i ρ) dla wykonania badań reszty belek.

Przed przekazaniem sprężenia na bocznej oraz na górnej powierzchni belek naklejano sensory oporu z bazą 50 mm. Po osiągnięciu 70% wytrzymałości w stosunku do projektowej wartości wytrzymałości betonu — wykonywano ściskanie doświadczalnych belek. Przed i po sprężeniu betonu rejestrowano odczyty tensometrów oporowych, naklejanych na betonie i zbrojeniu. Schemat badań belek oraz rozmieszczenia tensometrów oporowych podano na rysunkach 1 i 3.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia przyrządów pomiarowych: a) na górnej powierzchni; b) na bocznej powierzchni belki; c) na linach sprężających; d) na prętach zbrojeniowych; 1 — tensometry; 2 — czujniki zegarowe; 3 — ugięciomierze

Badania laboratoryjne belek na zginanie obciążeniem statycznym oraz zmęczeniowym przeprowadzono na uniwersalnej maszynie doświadczalnej „Lozenhauzen” z pulsatorem.

Obciążenia w postaci sił skupionych były przykładane w 1/3 długości przęsła belki.

W trakcie badań eksperymentalnych początkowe parametry obciążenia zmęczeniowego kontrolowano i podtrzymywano jako wartości stałe.

Belki badano w dwóch stanach obciążenia. Na początku obciążenia były dobierane tak, aby ich wartość M_{max} stanowiła $0,8 M_{cre1}$ wartości przy obciążeniu statycznym. Po zarysowaniu betonu poziom obciążenia zmęczeniowego zmniejszono i wtedy M_{max} przyjmował wartość równą $0,5 M_u$. Dla tego stanu obciążenia wykonywano 2×10^6 cykli obciążenia (baza doświadczenia) z częstotliwością pulsacji 425 cykli/min (7 Hz). Odształcenia betonu i zbrojenia były mierzone za pomocą tensometrów oporowych. Ugięcia belek na środku przęsła i pod siłami skupionymi mierzono dwoma czujnikami (bezwładnym i ruchomym), zamocowanymi na pionowym słupku za pomocą specjalnych uchwytów. Pozwalały one zmierzyć ugięcia zarówno podczas statycznego obciążenia, jak i bezpośrednio podczas obciążenia pulsacyjnego [6].

Przed rozpoczęciem badań, a także po ich zakończeniu, to jest po badaniach zmęczeniowych dla określonej liczby cykli (0,01; 0,02; 0,04; 0,1; 0,2; 0,7; 1,0; 1,5 i 2,0 mln) wykonano badania statyczne belek ze stopniowym wzrostem obciążenia do poziomu M_{max} . W trakcie badania mierzono pozostałe odształcenia po przyłożeniu obciążenia zmęczeniowego, a potem sprężyste i pełne odształcenia betonu oraz zbrojenia na każdym stopniu (przykładania) obciążenia zmęczeniowego.

4. Wyniki badań oraz ich analiza

Na podstawie zmierzonych odształceń zbrojenia sprężającego oszacowano straty sprężenia od pełzania i skurczu betonu. Odształcenia i naprężenia spowodowane pełzaniem i skurczem betonu — podano w tabeli 4.

TABELA 4

Odształcenia i naprężenia wywołane pełzaniem i skurczem betonu belek doświadczalnych

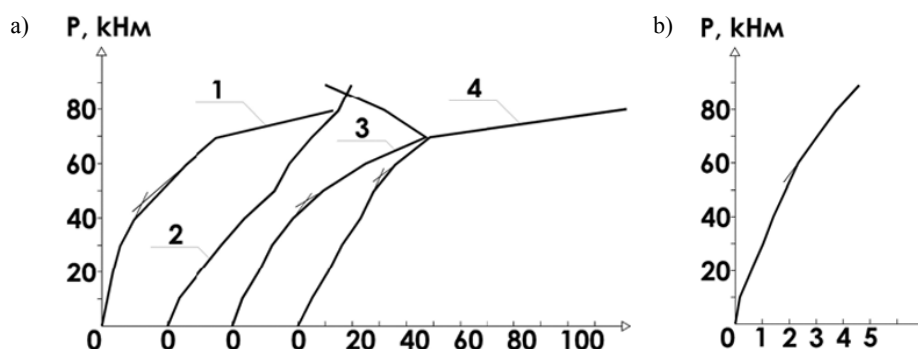
| Lp. | Typ belki | Czas obciążania belek, doby | $\epsilon_{n,y} \times 10^{-5}$ | $\sigma_{n,y}$, MPa |
|-----|-----------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1. | BS-1 | 152 | 52 | 93,5 |
| 2. | BS-2 | 164 | 56 | 101 |
| 3. | BSM-1 | 156 | 39 | 66,5 |
| 4. | BSM-2 | 225 | 60 | 102,5 |

Dla belki *BSM-1* której okres badania, był podobny jak w przypadku belek *BS-1* i *BS-2*, straty siły sprężającej wskutek pełzania oraz skurczu betonu były znacznie mniejsze, aniżeli w belkach w pełni sprężonych.

Wartości momentów rysujących dla poszczególnych belek, przy krótkotrwałym obciążeniu statycznym wyznaczano za pomocą:

- 1) wykresu „obciążenie — odkształcenie względne” $P - \epsilon$ (rys. 4a) biorąc pod uwagę największe odkształcenie (odczyt najbardziej odkształconego sensora);
- 2) mikroskopu z 24-krotnym powiększeniem;
- 3) wykresu „obciążenie — ugięcie” $P - f$ (rys. 4b);
- 4) obserwacji rysy.

Wyznaczenie momentu pojawienia się rysy w belce *BS-1* pokazano na rysunku 4, natomiast wartości momentów pojawienia się rys dla belek badanych pod obciążeniem statycznym podano w tabeli 5.



Rys. 4. Poziom obciążenia belek dla momentów rysujących belki *BS-1*:

- a) — na wykresie obciążenie — odkształcenie względne $P - \epsilon$;
 b) — na wykresie obciążenie — ugięcie $P - f$; 1, 2, 3 i 4 numery czujników odkształceń

TABELA 5

Wartości doświadczalne momentów zarysowania belek

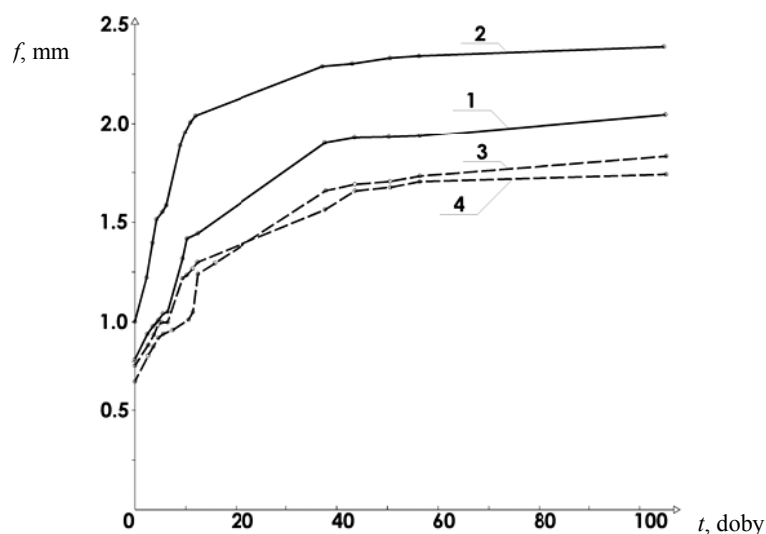
| Typ belki | N_{02} , kN | Wartość momentu rysującego, kNm | | | |
|--------------|---------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|
| | | według wykresu $P - \epsilon$ | z badań mikroskopem | według wykresu $P - f$ | na podstawie obserwacji rysy |
| <i>BS-1</i> | 152 | 27 | 30 | 34,5 | 36 |
| <i>BSM-1</i> | 106 | 19,5 | 24 | 27,5 | 30 |

Podczas badania belek pod obciążeniem rejestrowano początek tworzenia się rysy:

$$M_{\max} = 0,8 \cdot M_{cr} \left(\rho = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} = 0,1 \right)$$

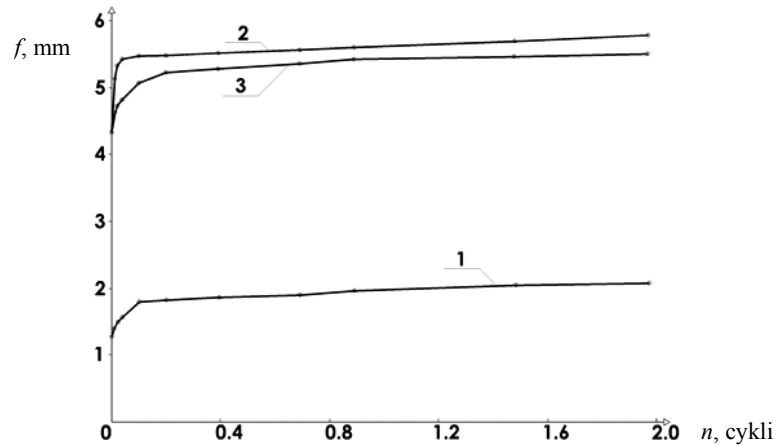
przy obciążeniu zmęczeniowym. Dla belki *BSM-2* po obciążeniu pulsacyjnym równym 0,04 mln cykli i dla belki *BS-2* po 0,065 mln cykli w betonie utworzyły się normalne rysy z szerokością rozwarcia $a_{cr} = 0,03$ mm. Po zwiększeniu liczby cykli obciążenia zmęczeniowego wysokość rys nieco powiększyła się, a ponadto zaczęły się one rozgałęziać na boki. Powoli na poziomie zbrojenia tworzyła się pozioma rysa, która sięgała do podpór. W tym samym czasie w pobliżu podpór — przy górnej powierzchni belki tworzyły się rysy pionowe. Jednak konstrukcja nadal pracowała jak łuk ze ściąganiem.

Podczas przeprowadzonych badań eksperymentalnych mierzono krótkotrwałe, jak i długotrwałe wygięcia belek w pełni sprężonych typu *BS-1*, *BS-2* oraz belek ze zbrojeniem mieszanym *BSM-1*, *BSM-2*. Zmianę wygięć w czasie pokazano na rysunku 5. Na końcu okresu badań po przekazaniu siły sprężającej, a przed przyłożeniem obciążania, wskutek rozwoju odkształceń pełzania oraz skurczu betonu, przyrost wygięć dla belek całkowicie sprężonych był większy aniżeli dla belek ze zbrojeniem mieszanym. Intensywny wzrost wygięć belek odbywał się w pierwszych 40 dniach po sprężaniu betonu.



Rys. 5. Zmiana wygięć w czasie:
1 — belki *BS-1*; 2 — belki *BS-2*; 3 — belki *BSM-1*; 4 — belki *BSM-2*

Rozwój ugięć w zależności od liczby cykli obciążenia zmęczeniowego pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Rozwój ugięć zależnie od liczby cykli obciążenia zmęczeniowego:
 1 — belka *BS-2* przy $\gamma = 0,3$ i $\rho = 0,1$; 2 — belka *BS-2* przy $\gamma = 0,5$ i $\rho = 0,1$;
 3 — belka *BSM-2* przy $\gamma = 0,5$ i $\rho = 0,1$

Na wykresach (rys. 5) widać, że przy jednakowych parametrach obciążenia zmęczeniowego ($\gamma = 0,5$ i $\rho = 0,1$) wraz ze wzrostem liczby cykli „*n*” ugięcia belek z pełnym sprężeniem rosną intensywniej aniżeli dla belek ze zbrojeniem mieszanym.

Najbardziej intensywnie wzrastają ugięcia w ciągu pierwszych 100÷200 tysięcy cykli obciążenia zmęczeniowego. Maksymalne zwiększenie pełnych ugięć w porównaniu z początkowym ugięciem statycznym wynosiło:

- dla belki typu *BS* — 1,6 przy $\gamma = 0,3$ i $\rho = 0,1$;
 1,35 przy $\gamma = 0,5$ i $\rho = 0,1$;
- dla belki typu *BSM* — 1,6 przy $\gamma = 0,5$ i $\rho = 0,1$.

Z analizy tej widać, że dla mniejszej wartości γ wraz ze wzrostem liczby cykli obciążeń zmęczeniowych ugięcia rosną intensywniej. Można to wyjaśnić tym, że dla małych poziomów obciążeń nie w pełni rozciągnany beton nad rysami wyklucza się z pracy podczas pierwszego statycznego obciążenia, i podczas powtórzenia obciążenia powoli wyklucza się on z pracy, pomniejszając sztywność belki. Ze wzrostem wartości ugięcia *f* podczas pierwszego statycznego obciążenia wysokość rozciąganego betonu nad pęknięciem maleje.

5. Wnioski

- 1) Wprowadzenie do konstrukcji sprężonej prętów zbrojenia zwykłego (zbrojenie mieszane) znacznie zmniejsza straty siły sprężającej od pełzania betonu. Fakt ten zwiększa odporność konstrukcji na zarysowanie i pęknięcie.

- 2) Pręty zbrojeniowe mają wpływ na rozstaw rys na długości konstrukcji. W belkach z mieszanym zbrojeniem powstaje znacznie więcej rys, jednak szerokość ich rozwarcia jest mniejsza.
- 3) Dla sprawdzenia skuteczności belek żelbetowych ze zbrojeniem mieszanym przeprowadzono ich badania na obciążenie statyczne i obciążenie zmęczeniowe oraz wykonano analizę porównawczą otrzymanych wyników z analogicznymi belkami sprężonymi całkowicie (*fully prestressed*).
- 4) Na skutek działania obciążenia zmęczeniowego w belkach pojawiała się nieznaczna liczba nowych rys (około 3÷4), przy czym nieco powiększała się ich długość i znacznie powiększała się szerokość rozwarcia rys (około 100%) w porównaniu z pierwszym cyklem obciążenia.
- 5) W belkach z mieszanym zbrojeniem, intensywność wzrostu ugięć w stosunku do wzrostu liczby cykli pulsacji obciążenia jest nieco mniejsza, aniżeli w belkach całkowicie sprężonych.

LITERATURA

- [1] *Lodo A.*: Strunobeton — sprzęt, technologie, możliwości produkcyjne, zalecenia konstrukcyjne. XVII Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji. Ustroń, 20–23 lutego 2002 r.
- [2] *Бабич Є.М., Борусик О.П., Коцебчук П.П.*: Залізобетонні балки і плити зі змішаним армуванням. Рівне, 1997, 134 с.
- [3] *Abeles P.W.*: Fully and Partially Prestressed Reinforced Concrete. Journal of the American Concrete Institute. 41 (1), 181–225
- [4] *Abeles P.W.*: Partial Prestressing in England. Journal of the American Concrete Institute. Vol. 8, No. 1, February 1963, pp. 51–72
- [5] *Bennett E.W.*: Partial Prestressing — A Historical Overview. Journal of the American Concrete Institute. 29 (5), 1984, pp. 104–117
- [6] *Стасюк М.И.*: Исследование влияния ненапрягаемой арматуры на работу предварительно напрягаемых железобетонных изгибаемых элементов при однократном и повторном приложении нагрузки. Дисс. на соиск. ... к.т.н., Львов, 1975, 214 с.
- [7] ГОСТ 13840–68. Канаты стальные арматурные 1x7. М.: Госстандарт, 1978 — 6с.
- [8] *Kubiak J., Lodo A.*: Sprężone i częściowo sprężone żerdzie elektroenergetyczne z betonu wirowanego. Inżynieria i Budownictwo Nr 1/1996, s. 24–26
- [9] Strunobetonowe i częściowo sprężone wirowane żerdzie elektroenergetyczne E i E_k , oświetleniowe EO i EOC i trakcyjno-oświetleniowe ETO . Aprobata Techniczna ITB, AT-15-3690/99