

## WYTRZYMAŁOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ GRANICZNA PRZY ROZCIĄGANIU FIBROBETONU Z WŁÓKNEM STALOWYM

JANUSZ KASPERKIEWICZ (WARSZAWA)

### 1. Stan aktualny zagadnienia

Fibrobeton jest to kompozyt o matrycy cementowej, którą stanowi zaczyn cementowy, zaprawa lub beton, uzbrojonej krótko pociętymi, rozproszonymi włóknami z metalu, szkła, węgla lub tworzyw sztucznych. Matryca fibrobetonu jest krucha, odkształcalność graniczna włókien uzbrojenia znacznie wyższa od odkształcalności matrycy, a w odróżnieniu od kompozytów wysokiej wytrzymałości procent uzbrojenia jest bardzo niewielki — np.  $\leq 3\%$  objętościowo. W związku z powyższym wszystkie informacje uzyskane na podstawie badań innych materiałów kompozytowych mają w odniesieniu do fibrobetonu ograniczoną przydatność i niezbędne jest w tym przypadku podejmowanie specjalnych badań o charakterze podstawowym.

Dla inżynierii budowlanej największe znaczenie ma fibrobeton z włóknem stalowym, zwany również drutobetonem. Do tego tylko tworzywa ograniczone były niniejsze badania.

Na temat fibrobetonu opublikowano stosunkowo wiele danych doświadczalnych. Pierwsze badania nad fibrobetonem z włóknem stalowym opisał ROMUALDI już w r. 1963 [1, 2], jednak liczba przeprowadzonych dotychczas badań nad rozciąganiem tego kompozytu jest znikoma [3]. Przyczyną są tu najprawdopodobniej trudności eksperymentalne. Mimo powszechnego zainteresowania betonem, dotychczas w nielicznych zaledwie przypadkach udało się uzyskać pełną krzywą  $\sigma$ — $\epsilon$  betonu nieuzbrojonego [4, 5], a podobne trudności występują również przy badaniach fibrobetonów. Brak jest publikacji dotyczących granicznej odkształcalności fibrobetonu zarówno przy rozciąganiu jak i przy zginaniu.

Wprowadzenie do kruchej matrycy cienkich włókien o wysokiej wytrzymałości daje w efekcie nowe tworzywo konstrukcyjne, nieporównywalne w zasadzie ani z betonem ani z żelbetem. Można przypuszczać, że obecność włókien zmienia właściwości otaczającej je matrycy, napewno zaś włókna mogą działać hamująco na propagację rys powstających przy zniszczeniu. W związku z tym szczególnej wagi nabierają obserwacje zachowania się materiału w fazie po zarysowaniu. Badania tego rodzaju prowadzić warto jedynie przy możliwie jednorodnym stanie naprężenia. Nie nadają się tu takie konwencjonalne próby wytrzymałościowe znane z technologii betonu, jak próba ściskania lub rozłupywania, ponieważ rzeczywisty rozkład naprężeń nie jest wówczas znany. Stosunkowo jednorodny stan deformacji występuje przy rozciąganiu osiowym, przy czym próba ta stanowi zarazem najsurowszy sprawdzian jakości wykonania materiału.

Wstępne prace własne oraz przegląd piśmiennictwa [3] wykazały, że proces zarysowywania się fibrobetonu, spowodowane zarysowaniem zmiany współczynnika odkształcalności itp., należy badać w dostatecznie sztywnej maszynie wytrzymałościowej, oraz w sztywnym układzie obciążającym. Chodzi tu o sztywność zarówno samej maszyny jak i szcęk, głowic, a nawet badanej próbki, ponieważ nadmiar energii zmagazynowanej w układzie rozciągającym spowoduje niekontrolowane zniszczenie rozciąganego elementu, bez możliwości obserwowania procesu zarysowywania się matrycy.

Jedną z podstawowych wątpliwości odnośnie fibrobetonu z włóknem stalowym dotyczy sposobu w jaki obecność gęsto rozproszonego, cienkiego włókna wpływa na pojawienie się i propagację rys w matrycy oraz na odkształcalność graniczną kompozytu. Zagadnienie odkształcalności granicznej postawiono już dawno w odniesieniu do tradycyjnego betonu i żelbetu: spowodowało ono zresztą liczne kontrowersje. Możliwość wzrostu odkształcalności granicznej matrycy w związku z nasyceniem jej uzbrojeniem rozproszonym przewidziano analitycznie [6], jednak doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy — np [7] nasuwa szereg wątpliwości.

Prowadzenie prób czystego rozciągania w zbyt „miękkiej” maszynie wytrzymałościowej oraz ograniczanie się do układów uzbrojenia tylko  $2D$  lub  $3D$ , tj. dwu- lub trój-wymiarowych, były przyczyną wyciągnięcia wniosków o znikomym wpływie włókien na wytrzymałość fibrobetonu — por. np. [8].

Dopiero w ostatnich latach udało się pomyślnie zastosować linearyzację rozproszonego uzbrojenia stalowego w matrycy [9].

Również niedawno uzyskano pierwsze wyniki dotyczące analizy rzeczywistego rozkładu włókien rozproszonych w kompozycie — m. in. [10, 11]. Dotychczas jednak zagadnienie wytrzymałości i odkształcalności granicznej przy rozciąganiu fibrobetonu z włóknem stalowym, a zwłaszcza wpływu na te cechy struktury uzbrojenia włóknistego, nie zostało wyjaśnione.

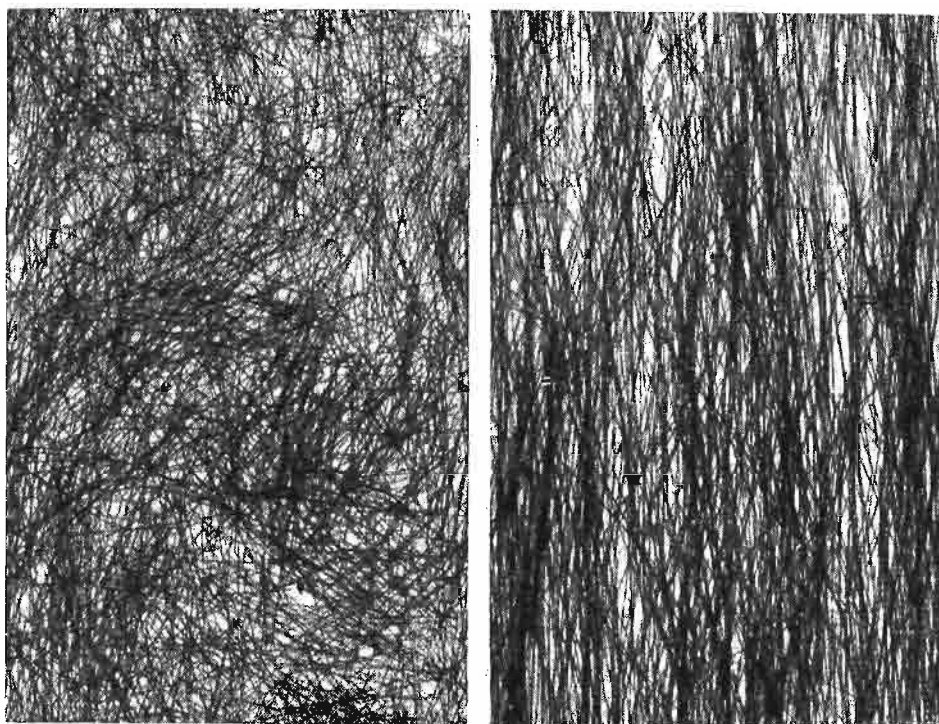
## 2. Cele, metoda i sposób przeprowadzenia badań

Celem niniejszych badań była dokładna obserwacja przebiegu zniszczenia w rozciąganych elementach z fibrobetonu uzbrojonego włóknem stalowym, a także stwierdzenie wpływu kształtu włókien oraz ich rozkładu na wytrzymałość i odkształcalność kompozytu. Układy pomiarowe zaprojektowano w ten sposób aby móc określić przy jakim obciążeniu i jakim odkształceniu pojawiają się pierwsze rysy, oraz jakie odkształcenie materiału można uznać za graniczne. Jako graniczne rozumiane jest tutaj odkształcenie jednostkowe, które występuje w materiale pod największym obciążeniem próbki rozciąganej, przy czym do odkształcenia tego wchodzi ewentualne mikrorysy. Eksperymenty miały ponadto wykazać jak wpływa obecność uzbrojenia włóknistego na rozkład i morfologię rys oraz czy w fibrobetonie z włóknem stalowym możliwe jest wystąpienie zarysowania wielokrotnego (multiple fracture — por. [6]), przewidywanego na drodze analitycznej ale dotychczas nie stwierdzonego doświadczalnie.

Celem podjętego programu badawczego było także stworzenie podstaw eksperymentalnych do analitycznego powiązania wytrzymałości i odkształcalności kompozytu z właś-

ciwościami i rozmieszczeniem uzbrojenia. Rozkład uzbrojenia obserwowany był za pomocą analizy zdjęć rentgenowskich, oraz przez pocięcie uprzednio zniszczonych w stanie osiowego rozciągania próbek i policzenie włókien widocznych na powierzchni przekroju poprzecznego. Wyniki tych obserwacji oraz teoria przedstawiona w [10, 11] powinny umożliwić określenie faktycznej zawartości włókien kompozycie, co stanowi jeden z najważniejszych parametrów fibrobetonu.

Z przebiegu dotychczasowych badań wiadomo było, że zawartość ta różni się często od zawartości projektowej, a uwzględnienie tej ostatniej wprowadza błędy wynikające z niewłaściwego mieszania, betonowania, linearyzacji itp. Przykłady radiogramów ilustrujące dwie odmienne struktury badanego materiału pokazano na rys. 1.

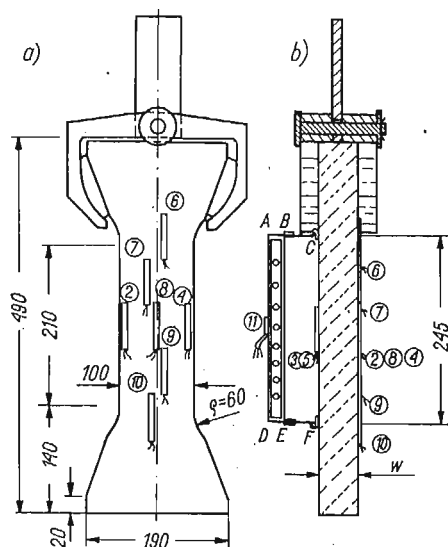


Rys. 1. Radiogramy wycinków ze środkowej części próbek włóknistych: a — dwuwymiarowy (2D) układ uzbrojenia w próbce nr 16, b — uzbrojenie zlinearyzowane (1D) w próbce nr 14; grubość warstwy fibrobetonu ok. 28 mm

Naprężenia rozciągające występują w większości rozmaicie obciążanych elementów konstrukcyjnych, w których stanowią lokalną, bezpośrednią przyczynę zniszczenia. Badania nad rozciąganiem są przeto niezbędne przy próbach opracowania podstaw projektowania konstrukcji fibrobetonowych, takich jak np. nawierzchnie drogowe (obciążenie w wyniku działania skurczu niejednorodnego), stracone formy do konstrukcji żelbetowych lub konstrukcje pływające (zginanie), konstrukcje powłokowe (dwuwymiarowe stany naprężenia) itp.

Wybór parametrów niniejszych badań oparto na przeprowadzonych doświadczeniach wstępnych. Zastosowano tylko jedną zawartość procentową uzbrojenia — 2% objętościowo, rozłożonego w matrycy w układzie jedno- i dwu-wymiarowym (1D i 2D). Włókno stalowe stosowano w dwóch gatunkach: krótsze i gładkie (długość  $\times$  średnica =  $25 \times 0,38$  mm,) oraz dłuższe i z zakotwieniami typu opatentowanego przez firmę Bekaert ( $30 \times 0,40$  mm). Badania miały wykazać w jakim stopniu zabieg linearyzacji układu włókien podnosi właściwości wytrzymałościowe kompozytu.

Do badań użyto próbek wiosełkowych, których kształt i wymiary, podobnie jak kształt szczęk do obciążania, zaprojektowano starając się uzyskać układ możliwie sztywny (rys. 2).



Rys. 2. Kształt próbki wiosełkowej i rozmieszczenie czujników do pomiarów odkształceń: a — widok boczny próbki, b — przekrój poprzeczny. Od 2 do 10 — elektrooporową tensometry o bazie 60 mm, przyklejane na powierzchni próbki, 11 — przykładany czujnik wydłużenia środkowej części próbki, o bazie pomiaru 254 mm, mocowany do reperów C i F przyklejonych na powierzchni betonu. Czujnik składa się ze sztywnego trzonu ABDE do którego przymocowano giętkie ramiona BC i EF, wyposażone w tensometry elektrooporowe w pełnym układzie mostkowym. W górnej części rysunku pokazano rozwiązanie konstrukcji szczęk do obciążania próbki

Z uwagi na wymiary szczęk, grubość próbek może sięgać 100 mm, jednak w omawianych badaniach ograniczono się do próbek o grubości 25 - 30 mm.

Matrycę zaprojektowano w ten sposób, że na 1 m<sup>3</sup> fibrobetonu wypadało 550 kg cementu, 1375 kg piasku o średnicy ziaren do 4 mm, oraz 270 l wody. Świeża mieszanina miała konsystencję charakteryzującą się opadem stożka rzędu 110 - 150 mm<sup>1)</sup>.

Do badań przygotowano ostatecznie 5 serii po 4 - 5 próbek, wg zestawienia jak poniżej:

<sup>1)</sup> Próbki do badań zostały wg szczegółowych wytycznych i pod nadzorem autora wykonane w CBI (Instytut Cementu i Betonu) w Sztokholmie, w ramach współpracy między PAN a Królewską Szwedzką Akademią Nauk.

Rodzaj uzbrojenia	Numeracja próbek
Matryca bez uzbrojenia	nr 1 do nr 5
Włókno gładkie — układ 2D	6 do 10
j.w. — układ 1D	11 do 14
Włókno z zakotwieniami	
— układ 2D	15 do 19
j.w. — układ 1D	20 do 24

Przy okazji betonowania próbek wiósełkowych wykonano dodatkowo serie próbek w postaci płyt z fibrobetonu o analogicznym składzie, które po upływie ok. miesiąca zostały zniszczone na drodze rozciągania psiowego, bezpośrednio w szczękach maszyny wytrzymałościowej, przy czym odkształcenia materiału nie były mierzone.

Na podstawie wstępnych badań własnych oraz studiów piśmiennictwa zrezygnowano ze stosowania do rozciągania uchwytów zaciskowych, jak również uchwytów przyklejanych, wybierając próbki o kształcie dostosowanym do specjalnie zaprojektowanych szczęk rozciągających (rys. 2).

Do obserwacji najważniejszej z badanych charakterystyk materiału — jego wydłużenia — zaprojektowano dwa niezależne układy pomiaru odkształceń podłużnych. Wydłużenie środkowej części próbki mierzono za pomocą czujnika przykładanego — ABCDEF na rys. 2 (odkształcenie globalne) oraz za pomocą tensometrów elektrooporowych naklejonych na powierzchniach bocznych próbki (odkształcenia lokalne). Wskazania tensometrów elektrooporowych miały poinformować, w których miejscach należy poszukiwać pojawiających się rys.

Wszystkie badania rozciągania próbek wiósełkowych przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 1251, wyposażonej w głowicę 200 kN (20 Ton), której tłok przemieszczał się ze stałą, zadaną prędkością — na ogół 0,5 mm/min. Odkształcenia centralnej części próbki w początkowej fazie obciążenia narastały z prędkością rzędu  $100 \cdot 10^{-6}$  na minutę.<sup>2)</sup>

Zestawienie zastosowanych układów pomiarowych pokazano na rys. 3. Maszyna wytrzymałościowa wyposażona była we własny układ rejestracji siły rozciągającej w funkcji przesuwu tłoka, jednak uzyskiwany w ten sposób wykres traktowano jako wskazanie kontrolne, ponieważ mimo swojej znacznej sztywności odkształcalność szczęk sumowała się z odkształcalnością próbki, obniżając dokładność pomiaru.

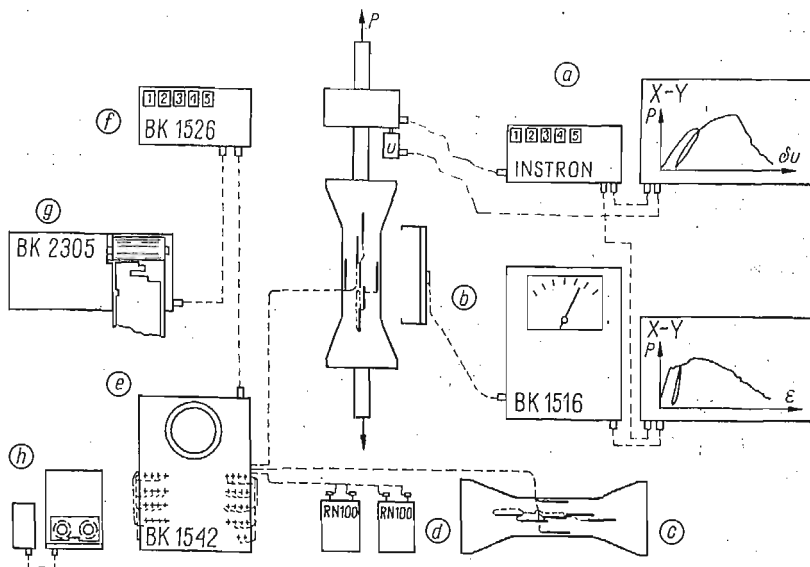
Pierwszy z zastosowanych układów do pomiaru wydłużenia próbki składał się (rys. 3 — układ b) z pokazanego uprzednio na rys. 2, czujnika przykładanego, mostka tensometrycznego, oraz rejestratora X—Y. Większość użytej aparatury pomiarowej była produkcji firmy Bruel i Kjaer (BK).

Czujnik przykładany własnej konstrukcji, mocowany był przed pomiarem w specjalnych reperach stalowych, (C i F — rys. 2), przyklejanych na bocznej powierzchni próbki. Baza pomiaru wynosiła 245 mm. Na obu ramionach czujnika wykonanych z hartowanej blachy stalowej o grubości 0,8 mm, naklejone były foliowe tensometry elektrooporowe pracujące

<sup>2)</sup>  $1 \cdot 10^{-6}$  — jednostka odkształcenia względnego, która w piśmiennictwie anglosaskim posiada własną nazwę „microstrain”, wobec braku odpowiednika polskiego, w tekście wszędzie stosowany jest mnożnik  $10^{-6}$

w układzie pełnego mostka. Czujnik cechowany był przed i po każdym cyklu pomiarów w specjalnej śrubie mikrometrycznej. Zakres liniowej pracy czujnika wynosił 4 mm, przy czym w razie potrzeby zakres ten dałoby się łatwo powiększyć poprzez wydłużenie ramion czujnika.

Odształcenia lokalne mierzono za pośrednictwem 9 tensometrów o długości bazy pomiarowej 60 mm i oporności 120 Ohm, rozmieszczonych jak pokazano na rys. 2. Tensometry o numerach od 2 do 5 służyły do oceny osiowości obciążenia, tensometry o numerach wyższych — do kontroli pojawiania się rys na całej długości użytkowej próbki.



Rys. 3. Zestawienie podstawowych układów pomiarowych: a — wskaźnik cyfrowy siły oraz rejestracja siły rozciągającej w funkcji przemieszczeń tłoka maszyny, b — rejestracja siły w funkcji wydłużenia środkowej części próbki, c — próbka kompensacyjna, d — para oporów wzorcowych podłączona jako tensometry nr 1, e — automatyczna skrzynka rozdzielcza, f — mostek tensometryczny ze wskaźnikiem cyfrowym i wyjściem analogowym, g — rejestrator poziomy, h — magnetofon z mikrofonem do dyktowania wskazań cyfrowych siły i odształceń na poszczególnych tensometrach

Każdy tensometr kompensowany był za pomocą analogicznego tensometru na próbce nie obciążanej (system 1-1), przy czym dokładne zrównoważenie układu uzyskiwano dzięki rezystorom na skrzynce rozdzielczej BK 1542.

Na pierwszym wejściu skrzynki rozdzielczej, jako parę tensometrów nr 1, włączono dwa opory wzorcowe RN 100 Ohm. Ponieważ wejście to odpowiada spoczynkowemu położeniu automatycznego wybieraka skrzynki, uzyskano dzięki temu kontrolę stabilności mostka, a także możliwość urzymywania mostka w stanie zrównoważonym, bez potrzeby przegrzewania któregośkolwiek z tensometrów czynnych. Układ pracował stabilnie i w przeciągu kilku godzin trwania pomiarów dryf zera nie przekraczał na ogół  $1 \div 2 \cdot 10^{-6}$ .

Odczytów dokonywano korzystając z mostka BK 1526, który posiada wyjście cyfrowe (na wskaźniku świetlnym), oraz wyjście analogowe. Sygnały z tego ostatniego wyjścia

zapisywano na rejestratorze poziomym BK 2305. Ponieważ papierowa taśma w tym rejestratorze może mieć szerokość co najwyżej 100 mm, zatem dokładność uzyskiwanego zapisu jest niewielka. W związku z tym rejestrację graficzną na taśmie papierowej potraktowano jako kontrolną w stosunku do zapisu na taśmie magnetofonowej, na którą operator dyktował kolejno wskazania odczytywane ze wskaźników cyfrowych mostka (odkształcenie) oraz maszyny wytrzymałościowej (siła rozciągająca). W sumie oba zapisy gwarantowały kontrolę kolejności prowadzenia odczytów oraz wysoką dokładność pomiarów. Pomiar prowadzono odczytując wskazania na mostku oraz wskazania wartości siły bez zatrzymywania ruchu tłoka maszyny wytrzymałościowej.

Wartości naprężeń odpowiadających poszczególnym wskazaniom tensometrów interpolowano liniowo przy opracowywaniu wyników pomiarów. Zastosowany układ umożliwił mierzenie odkształceń przy rozciąganiu w zakresie od  $5000 \cdot 10^{-6}$  z dokładnością  $10 \cdot 10^{-6}$ , lub w zakresie do  $2000 \cdot 10^{-6}$  z dokładnością  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Cykl obciążeń każdej próbki składał się z jednego lub dwóch obciążeń wstępnych do naprężenia ok.  $1 \text{ N/mm}^2$  ( $10 \text{ kG/cm}^2$ ), co pozwalało na sprawdzenie poprawności działania aparatury, osiowości ustawienia próbki etc., oraz z przebiegu zasadniczego. W przebiegu zasadniczym próbka była obciążana aż do stwierdzenia zarysowania, odciążana i ponownie obciążana aż do zniszczenia, tj. do widocznego rozdzielenia się jej na dwie części. Odciążanie i obciążenie ponowne stosowano niekiedy kilkakrotnie, co miało wykazać jak stabilny jest proces niszczenia się tworzywa.

Chwilę pojawienia się rys określano w sposób pośredni, na podstawie zmiany nachylenia wykresów uzyskiwanych z układów pomiarowych a i b (rys. 3), oraz na podstawie zaobserwowanych skokowych zmian wskazań tensometrów elektrooporowych. Ponieważ podczas obciążania dostęp do próbki był utrudniony (obecność tensometrów, reperów, kabli i czujników), a także ponieważ wyszukiwanie drobnych rys zajmuje wiele czasu, obserwacje i zaznaczanie rys prowadzono dopiero po pełnym zniszczeniu i odciążeniu próbki.

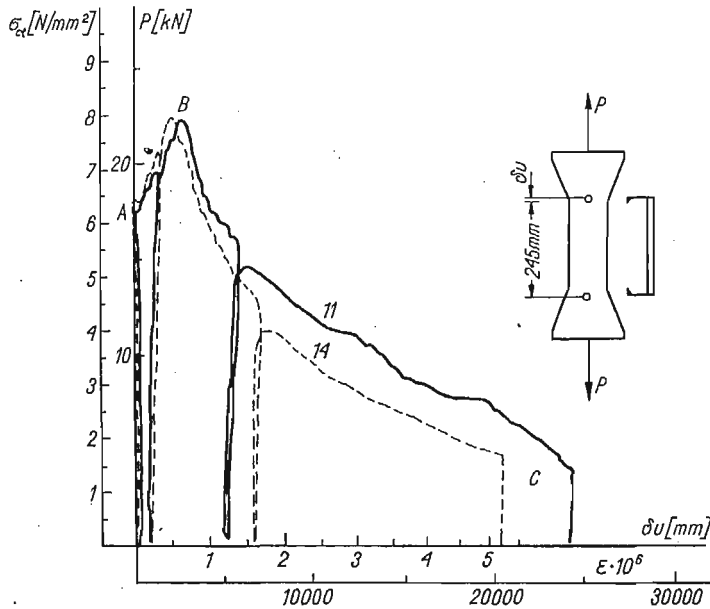
Do obserwacji rys stosowano mikroskop piórowy o powiększeniu  $32 \times$ , oraz mikroskop do badania odcisków metodą Brinella, wyposażony w skalę, o powiększeniu  $25 \times$ . Celem ułatwienia poszukiwań zastosowano barwienie badanej powierzchni mieszaniną w stosunku 1 : 5 nasyconych roztworów kwasu cytrynowego i nadmanganianu potasowego. Płyt ten lekko zabarwia beton i bardzo łatwo rozchodzi się wzdłuż istniejących rys. metoda ta wymaga jednak dalszego udoskonalenia. Podczas obciążania pojawianie się rys obserwowano tylko sporadycznie i bez stosowania układów powiększających (tzn. tylko gołym okiem), w związku z czym faktyczna kolejność w jakiej pojawiają się poszczególne rysy jest nieznaną.

### 3. Wyniki pomiarów

Przy badaniach w stanie rozciągania osiowego za źle przeprowadzone uważać należy doświadczenia, w których przełom następuje w miejscu o niezidentyfikowanym stanie naprężenia — np. w uchwytach lub na karbie wytworzonym w strefie zmiany kształtu próbki. W przeważającej większości omawianych tu wyników zniszczenie elementów

próbnych miało postać zadowalającą. Stwierdzony w środkowej części próbek mimośród nie przekraczał na ogół 2,5 mm, a ponadto z uwagi na pewną ciągliwość fibrobetonu znaczenie wycentrowania próbki malało w miarę zarysowywania się materiału. Mimośród ten spowodowany był prawdopodobnie niejednorodnością materiału lub wadami wykonania próbek, zaś ustawienie próbki w uchwytach miało nań wpływu drugorzędny. Ta ostatnia okoliczność świadczy o właściwym zaprojektowaniu układu obciążającego.

Dwa typowe wykresy uzyskane bezpośrednio z rejestratora  $X—Y$  przy użyciu czujnika przykładanego pokazano na rys. 4. We wszystkich zbadanych próbkach, za wyjątkiem



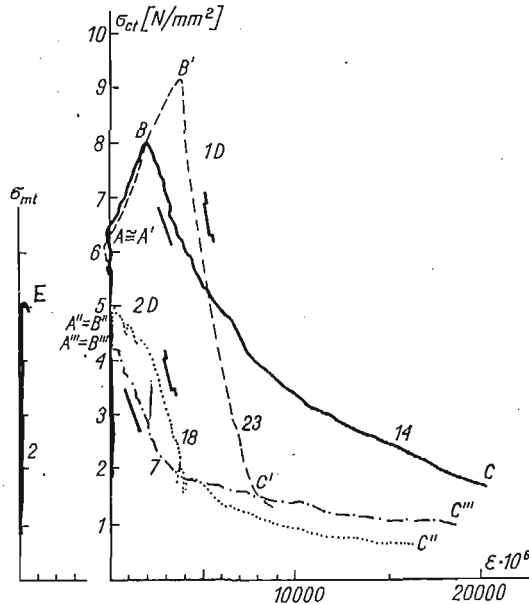
Rys. 4. Przykłady wykresów siły osiowej w funkcji wydłużenia, w próbkach nr 11 i 14, uzyskane bezpośrednio z rejestratora  $X—Y$ ; dodatkowo pokazane skale naprężeń i odkształceń mają tylko charakter orientacyjny. Odcinek  $AB$  — wzmocnienie materiału, w punkcie  $B$  jedna z rys zaczyna się rozszerzać w sposób nieodwracalny; odcinek  $BC$  — osłabienie materiału

próbek z matrycy nieuzbrojonej, nie stwierdzono zniszczenia kruchego. Wszystkie próbki fibrobetonowe można było w trakcie badania odciążyć i ponownie obciążyć do tej samej, w przybliżeniu wartości naprężenia rozciągającego. W przypadku zlinearyzowanego układu uzbrojenia zauważyć można było charakterystyczne wzmocnienie materiału, a we wszystkich próbkach fibrobetonowych zauważyć było można ponadto osłabienie, tzn. stopniowy spadek siły w próbce wraz ze wzrastającym jej wydłużeniem.

Porównawcze zestawienie typowych wykresów  $\sigma—\epsilon$ , uzyskanych w poszczególnych grupach próbek, pokazano na rys. 5. Zastosowane uzbrojenie, dawało w przypadku dwuwymiarowego rozkładu włókien (2D) wyraźne zwiększenie ciągliwości materiału — odcinki  $B''—C''$  oraz  $B'''—C'''$  na rys. 5 — ale nie dawało zwiększenia wytrzymałości, która niekiedy nawet malała. Przyczyną tego spadku wytrzymałości może być ujemny wpływ obecności włókien na takie cechy matrycy jak stosunek  $w/c$ , urabialność, porowatość etc, przy niewielkiej jednocześnie efektywności uzbrojenia.



Na podstawie poczynionych obserwacji można przypuszczać że przebieg niszczenia próbek był następujący. Do naprężenia rzędu 4-6 N/mm<sup>2</sup> (40-60 kG/cm<sup>2</sup> — punkty A''', A'' oraz A na wykresach na rys. 5) odkształcenia rosły liniowo, były sprężyste, a rysy nie pojawiały się. Powyżej tej wartości naprężenia nie wzrastały w próbkach uzbrojonych dwuwymiarowo. W próbkach tych pojawiała się niewielka liczba rys, z których jedna zaczynała się od razu rozszerzać katastrofalnie. Uzyskiwany wykres odkształceń globalnych (wydłużenia próbki) był od tego miejsca (punkty A'' = B'' oraz A''' = B''') faktycznie wykresem wyłękania włókien na powierzchni przełomu. W próbkach o uzbrojeniu zlinearyzowa-



Rys. 5. Przykłady wykresów uzyskanych za pomocą czujnika przykładanego, charakterystycznych dla poszczególnych serii próbek (liczby oznaczają numery próbek). Na wykresach pominięto wykonane cykle odciążania i ponownego obciążania próbek. Wykres po lewej stronie przedstawia wykres z rozciągania próbki niezbrojonej, która zniszczyła się w sposób kruchy (punkt E na wykresie)

nym, na odcinkach AB oraz A'B' następowało powstawanie nowych rys, prawdopodobnie przy nieznacznym powiększaniu się szerokości rozwarcia rys już istniejących. Tworzenie się powierzchni przełomu można było zaobserwować dopiero po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia (wytrzymałości — punkty B oraz B'), przy czym powierzchnia ta nie wypadała na ogół w miejscu pierwszych rys zaobserwowanych gołym okiem.

Zestawienie najważniejszych uzyskanych wyników liczbowych podano w Tabl. 1. W tablicy tej zaznaczono również dla porównania dane o wytrzymałości fibrobetonu rozciąganego w wieku ok. 1 mies. Przyjmując, że różnica w technologii wykonania obu porównywanych badań ma znaczenie drugorzędne, można zauważyć że wzrost wytrzymałości matrycy niezbrojonej był w okresie 1 roku stosunkowo wyższy niż podobny wzrost w przypadku fibrobetonów.

Z porównania dwóch zastosowanych gatunków włókien wynika, że wpływ długości i przyczepności włókna na właściwości mechaniczne kompozytu jest bardziej widoczny

w przypadku uzbrojenia zlinearyzowanego niż w przypadku uzbrojenia o układzie dwuwymiarowym. Korzyść ze stosowania włókien z zakotwieniami widoczna jest wyraźnie dopiero wtedy gdy włókna ułożone są w kierunku działania głównych naprężeń rozciągających.

Tablica 1. Wyniki badań rozciągania włoselkowych próbek fibrobetonowych<sup>1</sup>

Materiał w danej serii próbek	Układ włókien	Wytrzymałość N/mm <sup>2</sup> 2)		Współcz. sprężystości przy naprężaniu $\sigma_{cr} = 3 \text{ N/mm}^2$ [GN/m <sup>2</sup> ] <sup>3)</sup>	Maksymalne odkształcenie w materiale nie rozerwanym [10 <sup>-6</sup> ]
		Wg badań CBI po 28 <sup>4)</sup> dniach	Wg. badań na próbkach włoselkowych po ok. 300 dniach		
Matryca nieuzbrojona	—	1,7 (0,6)	4,93 (0,74)	35,4 (6,1)	125 (55)
2% obj. włókien gładkich 25 × 0,38 mm	2D	3,5 (0,6)	4,13 (0,76)	32,2 (4,3)	252 (95)
j.w.	1D	5,5 (0,7)	7,98 (0,67)	34,0 (6,6)	1324 (183)
2% obj. włókien z zakotwieniami (typu Bekaert) 30 × 0,40 mm	2D	3,8 (0,6)	4,42 (0,98)	36,2 (3,2)	409 (295)
j.w.	1D	6,4 (1,2)	9,88 (0,68)	40,9 (7,0)	2079 (728)

Uwagi: 1) w nawiasach podano wartości odchyłań standardowych.

2) 1 N/mm<sup>2</sup> = 10 kG/cm<sup>2</sup>

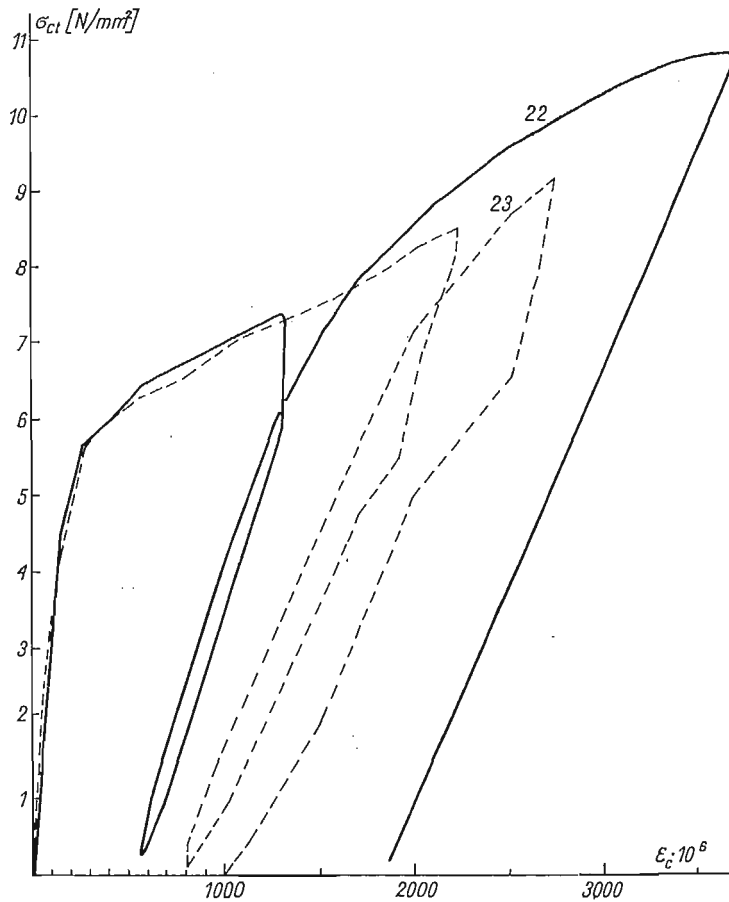
3) 10 GN/m<sup>2</sup> = 100 000 kG/cm<sup>2</sup>

4) próbki w kształcie płaskowników, zaciskane bezpośrednio w szczękach maszyny.

Czujnik przykładany mierzy poprawnie odkształcenia jednostkowe tylko do osiągnięcia wytrzymałości materiału. Dalsza część uzyskiwanego wykresu, chociaż przedstawia wydłużenie próbki wraz z powstającymi rysami, nie odpowiada odkształceniu materiału, ponieważ wydłużenie związane jest przede wszystkim z mechanizmem wywlekania włókien na pojedynczej powierzchni przelomu. Tensometry elektrooporowe naklejone wzdłuż próbki mierzą natomiast faktycznie odkształcenia lokalne, włącznie z rozwieraniem się lub zwieraniem przebiegających pod nimi mikrorys. Przykłady wykresów ze wskazań tensometrów powierzchniowych, uzyskanych przez uśrednienie odczytów z większości badanych punktów pomiarowych, pokazano na rys. 6. Przy uśrednianiu pominięto wskazania tensometrów ulegających zniszczeniu, tzn. przede wszystkim tych, przez które przebiegała powierzchnia przelomu. Uzyskano w ten sposób wykresy odkształceń lokalnych, dotyczące materiału obciążanego aż do naprężeń rzędu wytrzymałości i następnie odciążonego.

Pomiar tego rodzaju należałoby prowadzić korzystając z ciągłej rejestracji wskazań wszystkich tensometrów powierzchniowych. Natomiast przy przyjętej technologii pomiarowej trzeba było stosować interpolację wyników.

Uśrednione wykresy z lokalnych pomiarów odkształceń pokazano na rys. 7. Są one



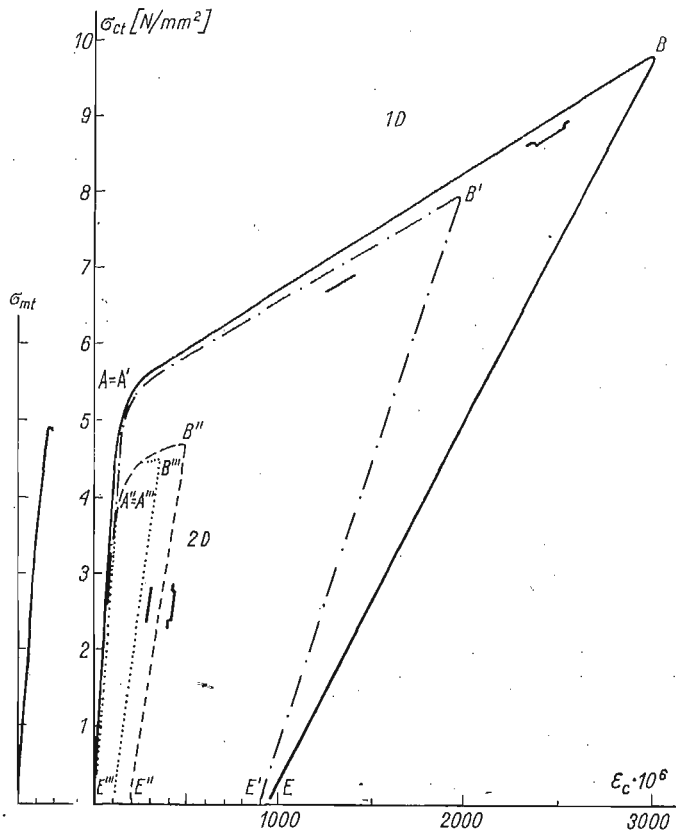
Rys. 6. Średnie odkształcenia lokalne zmierzone tensometrami oporowymi, w funkcji naprężenia rozciągającego. Włókna o układzie zlinearyzowanym (1D). Uwzględniono wskazania tensometrów: próbka nr 22 — 2, 7, 8, 9 i 10, próbka nr 23 — 6, 7, 8, 9 i 10 (oznaczenia tensometrów — rys. 2).

niesprzeczne z uzyskanymi inną techniką pomiarową wykresami na rys. 5, a dodatkowo uwidaczniają wspomniany już fakt, że zstępujące gałęzie wykresów na rys. 5 (odcinki  $BC$ ,  $B' C'$ ,  $B'' C''$ ,  $B''' C'''$ ) odzwierciedlają jedynie mechanizm lokalnego wywlekania włókien z powierzchni przełomu. Wykresów takich jak pokazano na rys. 6 i 7 nie możnaby wykonać w odniesieniu do samej strefy przełomu, rozkład naprężeń w przekroju próbki przestaje być jednorodny.

Na podstawie rys. 7 można wnioskować, że linearyzacja włókien podwyższa wartość naprężenia rysującego w fibrobetonie. Natomiast zarówno linearyzacja jak i sama obecność uzbrojenia włóknistego nie mają wpływu na wartość wydłużenia jednostkowego, przy którym pojawiają się w materiale rysy. Na podstawie analizy wskazań tensometrów powierzchniowych można przy puszczać, że rysy w fibrobetonie pojawiają się przy odkształceniach  $100 - 200 \cdot 10^{-6}$ , tj. przy takich samych odkształceniach granicznych jakie podawane są odnośnie klasycznego betonu lub żelbetu. Niewątpliwym efektem linearyzacji jest

natomiast wyraźnie widoczne wzmocnienie materiału — odcinki  $AB$  oraz  $A'B'$  na wykresach  $\sigma - \epsilon$  (rys. 5 oraz rys. 7).

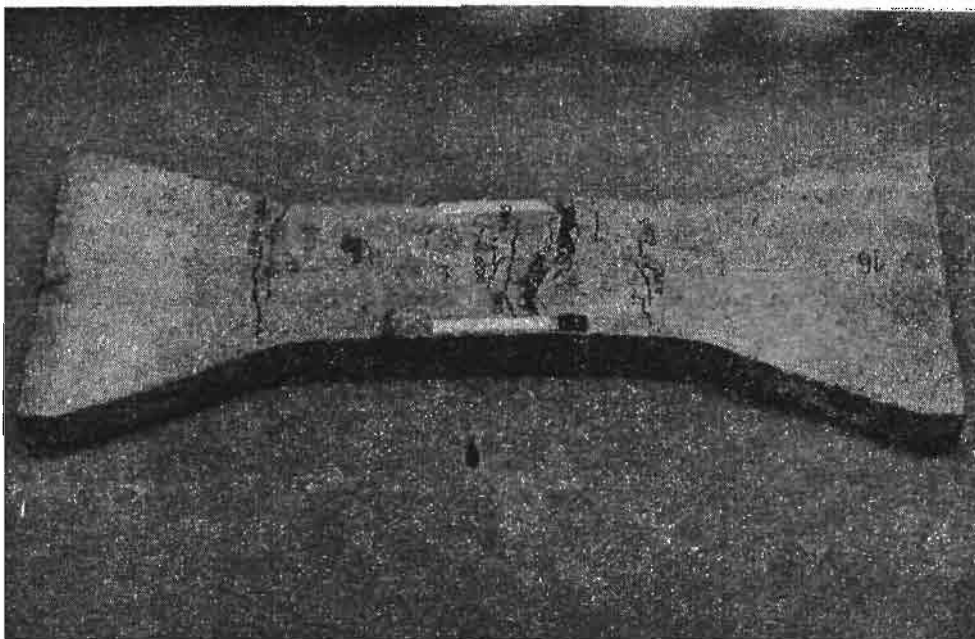
Wykresy na rys. 7 zgodne są z obserwacjami struktury zarysowania poszczególnych próbek. Przykłady obrazów rys na dwóch próbkach fibrobetonowych, uzbrojonych jedna dwuwymiarowo (2D) a druga włóknem o układzie zlinearyzowanym (1D), pokazano na



Rys. 7. Zestawienie uśrednionych przebiegów odkształceń lokalnych w niezniszczonym materiale próbek, dla wszystkich badanych serii materiału. Wykres po lewej stronie dotyczy rozciągania matrycy niezbrojonej

rys. 8 i 9. Próbkę z matrycy niezbrojonej ulegały zniszczeniu przez rozwarcie się rysy pojedynczej, na próbkach z uzbrojeniem o układzie dwuwymiarowym (2D) można było po zniszczeniu stwierdzić 3 - 4 rysy, natomiast próbki zlinearyzowane ulegały zniszczeniu przy pojawieniu się kilkunastu rys, których średni rozstaw mierzony w kierunku osi próbki wynosił ok. 20 mm.

Stwierdzono, że w warunkach odpowiadających temu doświadczeniu, fibrobeton o odpowiednim układzie i odpowiedniej zawartości uzbrojenia może przenosić bez obniżenia wytrzymałości odkształcenia rzędu  $2000 \cdot 10^{-6}$ , tj. odkształcenia 10 - 20 razy większe niż w przypadku zwykłego betonu. Wartość tę można określić jako graniczne wydłużenie fibrobetonu. Odkształcenia te dotyczą oczywiście fibrobetonu w którym matryca



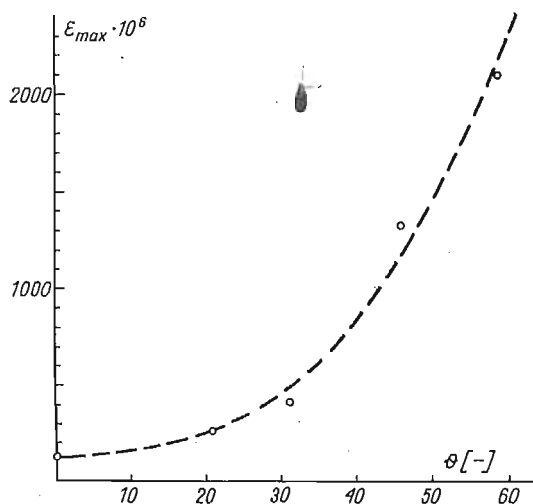
Rys. 8. Wygląd po zniszczeniu próbki o dwuwymiarowym rozkładzie uzbrojenia — próbka nr 16. Przy rysach zaznaczono ich rozwartości



Rys. 9. Wygląd po zniszczeniu próbki o zlinearyzowanym układzie uzbrojenia — próbka nr 20. Przy rysach zaznaczono ich rozwartości

jest już zarysowana, co o tyle nie ma znaczenia, że owe rysy nie wpływają na wytrzymałość kompozytu. Z rozważań wyłączono tu kwestię trwałości materiału. Poczynione niedawno obserwacje [12] pozwalają jednak sądzić, że również zarysowany fibrobeton jest dość odporny na korozję.

Do analitycznego przewidywania mechanicznych właściwości fibrobetonu autor zaproponował uprzednio, [13], tzw. parametr wzmocnienia ( $\Theta$ ). Wartość tego parametru jest wprost proporcjonalna do długości i przyczepności włókien oraz odwrotnie proporcjonalna do tzw. pozornego rozstawu włókien [10, 11]. Rozstaw pozorny włókien stanowi miarę rozmieszczenia włókien w kompozycie i zależy zarówno od kształtu i zawartości



Rys. 10. Zależność pomiędzy granicznym wydłużeniem fibrobetonu max a parametrem wzmocnienia  $\Theta$ , określającym strukturę uzbrojenia fibrobetonu

włókien jak i od struktury kompozytu (rozkłady włókien trójwymiarowe, płaskie, zlinearyzowane etc.). Wartości parametru  $\Theta$  obliczono dla nominalnych charakterystyk badanych fibrobetonów, przyjmując że przyczepność włókien zakotwionych jest o 30% wyższa od przyczepności włókien gładkich. Na rys. 10 naniesiono punkty, których odcięte stanowią znalezione w opisany sposób wartości parametru  $\Theta$ , natomiast jako rzędne odłożono znalezione doświadczalnie wartości odkształcenia maksymalnego, wg. ostatniej kolumny w tabl. 1. Uprzednio stwierdzono [13], że wytrzymałość (na zginanie, rozciąganie i udarność) zależy liniowo od  $\Theta$ . Z obecnych badań wynika, że wydłużenie graniczne fibrobetonu zależy od tego samego parametru w sposób nieliniowy, być może paraboliczny.

#### 4. Wnioski

Badania wykazały, że odpowiednio uzbrojony fibrobeton z włóknem stalowym zachowuje się plastycznie, wykazując wyraźne wzmocnienie. Znaczący to, że powyżej granicy sprężystości odkształcenia trwale rosną wraz z naprężeniem rozciągającym. Przynajmniej

w pierwszym przybliżeniu wzrost ten można uznać za liniowy, zagadnienie wymaga jednak dalszych badań. Jako „odpowiednio” uzbrojony rozumiany tu jest fibrobeton zawierający ok. 2% obj. włókien o układzie zlinearyzowanym. Oddzielnie badania warto by podjąć celem określenia jakie najniższe zawartości włókien o układzie dwu- lub trój-wymiarowym dawałyby również efekt wzmocnienia.

Fibrobeton ze zlinearyzowanym układem uzbrojenia może odkształcać się do wartości rzędu  $2000 \cdot 10^{-6}$ , przy czym powstające jednocześnie rysy mają rozwarłość rzędu 0,03 - 0,05 mm. Rysy takie mają prawdopodobnie niewielki wpływ na trwałość kompozytu.

W fazie niezarysowanej fibrobeton odkształca się sprężysto, w zasadzie niezależnie od układu uzbrojenia. Moduł sprężystości kompozytu można określić w przybliżeniu na podstawie znanego prawa mieszania. Odkształcalność graniczna matrycy cementowej nie ulega zmianie w zakresie stosowanych parametrów doświadczenia (długość, średnica oraz zawartość objętościowa włókien).

Na zachowanie się fibrobetonu po zarysowaniu zasadniczy wpływ ma układ uzbrojenia. Wzmacniający matrycę efekt uzbrojenia będzie największy przy ułożeniu włókien wzdłuż kierunku głównych naprężeń rozciągających. Efektywność uzbrojenia fibrobetonu zależy również od przyczepności włókien, jednak i ten wpływ bardziej widoczny staje się przy zlinearyzowanym układzie uzbrojenia.

Wydaje się, że zaproponowany parametr odkształcenia maksymalnego dobrze charakteryzuje odkształcalność graniczną fibrobetonu. Można np. przypuszczać, że materiały charakteryzujące się podobną wydłużalnością jak powyżej omówione fibrobetony z uzbrojeniem zlinearyzowanym, byłyby również bardziej odporne na wymuszone przemieszczenia, skurcz jednorodny, naprężenia termiczne itp., niż tradycyjne konstrukcje betonowe.

Badania nie wykazały aby zastosowany procent uzbrojenia włóknistego był w stanie podwyższyć graniczną wartość odkształcenia matrycy, tak jak to przewidywane było w [6]. Ewentualna odpowiedź na to pytanie mogłaby wynikać z doświadczeń prowadzonych w stanie rozciągania osiowego na próbkach ze zlinearyzowanym uzbrojeniem, o maksymalnej, technologicznie możliwej do wymieszania w matrycy zawartości włókien.

Efekt włókien jest najbardziej widoczny w młodym betonie. Stąd wypływa celowość posługiwania się fibrobetonem do wykonywania form straconych, napraw, konstrukcji wznoszonych w ograniczonym czasie itp.

#### Literatura cytowana w tekście

1. J. P. ROMUALDI, G. B. BATSON, *Behaviour of reinforced beams with closely spaced reinforcement*. ACI Journal, Proc. 60, 6 (June), s. 775—790, (1963).
2. J. P. ROMUALDI, J. A. MANDEL, *Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement*. ACI Journal, Proc. 67, 6 (June), s. 657—671, (1964).
3. J. KASPERKIEWICZ, *Odkształcalność przy rozciąganiu fibrobetonu z włóknem stalowym*. W zeszycie problemowym techniki mostowej pt. „Kompozyty betonowe — właściwości mechaniczne i zastosowania”, SITKOM-Kielce, (1974), 4, s. 65—93.
4. R. H. EVANS, M. S. MARATHE, *Microcracking and stress — strain curve for concrete in tension*, Matériaux et Constructions, 1, Jan.-Feb., s. 61—64, (1968).

5. B. P. HUGHES, G. P. CHAPMAN, *The complete stress-strain curve for concrete in direct tension*. Bulletin RILEM No 30, March. s. 95—97, (1966).
6. J. AVESTON, G. A. COOPER, A. KELLY, *Single and multiple fracture.*, Proc. Conf. on „The properties of fibre composites”, Nat. Phys. Lab., IPC Sc. a Techn. Press Ltd. 1971, s. 15—26.
7. K. KOBAYASHI, R. CHO, *Mechanics of concrete with randomly oriented short steel fibres*. Proc. of the II Intern. Conf. on Mech. Behaviour of Materials—16—20 August 1976, Boston, Massachusetts, s. 1938—1942.
8. J. EDGINGTON, D. J. HANNANT, R. I. T. WILLIAMS, *Steel fibre reinforced concrete*, Building Res. Establishment Current Paper — CP 69/74, 17 stron.
9. FIBERBETONG. NORDFORSK projektkomite' för FRC-material. 2 części: 140+521 stron. Stockholm (1977).
10. J. KASPERKIEWICZ, *Fibre spacing in steel fibre reinforced composites*, Matériaux et Constructions, 10, 55 (Jan.-Feb.) s. 25—31, (1977).
11. J. KASPERKIEWICZ, *Apparent spacing in fibre reinforced composites*. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. Sci. Techn., 26, 1, s. 55—63 (1978).
12. *Fibre reinforced cement and concrete*. RILEM Symposium London 1975, Ed. A. NEVILLE, *The Construction Press Ltd.*, Hornby 1975, vol. I+II, 650 stron.
13. J. KASPERKIEWICZ, *Reinforcement parameter for fibre reinforced concrete like composites*. Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. Sci. Techn. 26, 1, s. 65—72 (1978).

## Резюме

ПРОЧНОСТЬ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ УДЛИНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ БЕТОНА  
АРМИРОВАННОГО КОРОТКИМИ СТАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Приведены результаты экспериментов на бетоне содержащем 2% (по объёму) дисперсной стальной арматуры в виде коротких волокон (фибробетон). Исследовались два типа ориентации волокон: плоско расположенных (2D) и линейно расположенных (1D). Измерение удлинений и деформаций обеспечивалось с помощью нескольких измерительных систем. Разрушение фибробетонных образцов происходило всегда по пластической (не хрупкой) схеме, а в случае 1D наблюдалось упрочнение а также явление многократного растрескивания.

## Summary

## TENSILE STRENGTH AND ULTIMATE STRAIN IN STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE

Fibre concrete specimens reinforced with 2% vol. of plain and hooked steel fibres have been tested in direct tension. The fibres were of two-dimensional (2D) orientation or they were magnetically aligned (1D). Several independent systems were used to measure strain and elongation of the specimens. The failure of fibre reinforced concrete was always ductile and the specimens of 1D type shown distinct strain hardening behaviour. In the latter case it was also possible to observe the multiple cracking of the matrix.

IPPT PAN  
WARSZAWA

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 lutego 1978 r.