

Na prawach rękopisu

INSTYTUT BUDOWNICTWA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport Serii /2002

**Dostosowywanie składu wysokowartościowej
matrycy do parametrów niskomodulowych
włókien węglowych z wykorzystaniem
metody badań reologicznych**

Dominik LOGOŃ

PRACA DOKTORSKA

Promotor – prof. dr hab. inż. Leokadia Kucharska

**Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, włókna węglowe, reologia,
zwielokrotnione zarysowanie**

Wrocław 2002

PODZIĘKOWANIA

Pragnę podziękować promotorowi Pani prof. Leokadii Kucharskiej za pomoc przy realizacji tej pracy.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dominik Logoń', with a long horizontal flourish extending to the right.

Dominik Logoń

SPIS TREŚCI

	str.
Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Streszczenie	7
1. Wstęp	8
1.1 Wprowadzenie	8
2. Omówienie stanu wiedzy na podstawie literatury	11
2.1 Tradycyjne i wysokowartościowe kompozyty cementowe	11
2.1.1 Podstawowe składniki matrycy	13
2.1.2 Rodzaje włókien i ich charakterystyka	16
2.1.3 Procesy technologiczne	21
2.1.4 Zastosowania w budownictwie	23
2.2 Właściwości reologiczne mieszanek cementowych	25
2.2.1 Reologia mieszanek cementowych	25
2.2.2 Metody badań	27
2.2.3 Wpływ składników na reologię mieszanek	30
2.2.4 Rozpraszanie włókien w mieszankach	37
2.3 Właściwości mechaniczne kompozytów	39
2.3.1 Mechanizm kontrolowania propagacji rys	39
2.3.2 Krytyczna długość włókien	40
2.3.3 Zwielokrotnione zarysowanie-niezbędna zawartość włókien	42
2.3.4 Metody oceny kruchości i odporności na pękanie	48
2.3.5 Efekt uzbrojenia włóknami, wpływ starzenia	51
2.4. Podsumowanie	57
3. Badania własne	58
3.1 Cel i zakres pracy	58
3.2 Tezy	58
3.3 Materiały i ich charakterystyka	59
3.4 Badane składy	62
3.5 Przygotowanie próbek do badań	67
3.6 Metody badań	68

4. Wyniki i ich omówienie	71
4.1 Wpływ składu matryc i zawartości włókien na właściwości reologiczne mieszanek	71
4.1.1 Wpływ mikrowypełnienia	71
4.1.2 Wpływ zawartości i uziarnienia piasku	73
4.1.3 Wpływ zawartości włókien	75
4.1.4. Możliwa do rozproszenia ilość włókien	80
4.2 Wpływ składu matryc i kompozytów na właściwości fizyczne i mechaniczne	87
4.2.1 Gęstość, porowatość, nasiąkliwość	87
4.2.2. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie	91
4.3 Odporność na pękanie kompozytów cementowych	96
4.3.1 Wpływ zawartości włókien na zdolność do odkształceń modyfikowanych matryc	96
4.3.2 Efekty uzbrojenia zaczynów i zapraw przy wyznaczonej zawartości włókien	111
4.3.3 Zwiększenie kontroli propagacji rys włóknami szklanymi	117
4.4 Podsumowanie i wnioski	124
Literatura	126
Zestawienie wyników	132
Summary	136

Wykaz ważniejszych oznaczeń

matryca	- zaczyn, zaprawa bez włókien
kompozyt	- matryca cementowa z włóknami
FRC	- kompozyt (ang. Fiber Reinforced Composite)
HPFRC	- wysokowartościowy kompozyt (ang. High Performance Fiber Reinforced Composite)
GRC	- kompozyt cementowy z włóknami szklanymi (ang. Glass - Fibre Reinforced Composite)
w	- woda
c	- cement
b	- spoiwo
Z	- zaczyn
M	- zaprawa
P	- piasek
S	- pył krzemionkowy
A	- popiół
Sp	- superplastyfikator
F	- włókna węglowe (niskomodułowe typu „pitch”)
F _c	- włókna szklane (Cem-FIL, integral)
V _f	- zawartość włókien węglowych (% obj.)
V _{fc}	- zawartość włókien szklanych (% obj.)
P/c	- stosunek piasku do cementu
/mm	- oznaczenie maksymalnego ziarna piasku (np./0.25 –0,25mm)
d _{max}	- maksymalna średnica ziarna piasku
φ _{st}	- ułamek objętościowy fazy stałej
η	- lepkość
η _{pl}	- lepkość plastyczna
h	- parametr reologiczny odpowiadający η _{pl}
τ	- granica płynięcia
g	- parametr reologiczny odpowiadający τ
$\dot{\gamma}$	- prędkość ścinania
L	- długość włókna
d	- średnica włókna
ρ	- gęstość (właściwa) materiału
ρ _p	- gęstość (pozorna) materiału
n _w	- nasiąkliwość wagowa

- p_o - porowatość otwarta
- P - siła obciążająca próbkę
- P_{kr} - krytyczna siła zginająca (maksymalna liniowej zależności naprężenie-ugięcie)
- P_{max} - maksymalna siła zginająca
- u - ugięcie zginanego elementu próbnego (wg ASTM 1018 - δ)
- E_d - moduł sprężystości kompozytu
- E_f - moduł sprężystości włókna
- f_{ft} - wytrzymałość włókien na rozciąganie
- f_t - wytrzymałość na rozciąganie
- f_c - wytrzymałość na ściskanie
- f_{kr} - granica proporcjonalności przy zginaniu
- f_{zg} - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu
- I_5, I_{10}, I_{30} - wskaźniki odporności na pękanie przy zginaniu wg ASTM 1018
- F_s - wskaźnik zarysowania
- F_t - wskaźnik wzmocnienia
- F_d - wskaźnik osłabienia
- W_{kr} - energia pękania przy zginaniu określona wielkością pola powierzchni pod krzywą obciążenie - ugięcie, do punktu krytycznego obciążenia
- W_{max} - energia pękania przy zginaniu, określona wielkością pola powierzchni pod krzywą wykresem obciążenie - ugięcie do punktu maksymalnego obciążenia
- W_{10} - energia pękania przy zginaniu określona wielkością pola powierzchni pod krzywą obciążenie - ugięcie, powyżej 10% wartości maksymalnego obciążenia
- AE - emisja akustyczna
- Suma AE - suma efektów akustycznych (liczba zliczeń)

STRESZCZENIE

Praca przedstawia wyniki badań nad zwiększeniem odporności na kruche pękanie kompozytów cementowych typu zaczynów i zapraw, zastosowaniem rozproszonego uzbrojenia w postaci włókien węglowych typu „pitch”.

Dobór składu matrycy i zawartości włókien oparto na wynikach pomiarów parametrów reologicznych mieszanek oraz wskaźnikach odporności na pękanie próbek wyznaczonych z prób zginania. W badaniach uwzględniono wpływ zawartości i wielkości ziaren drobnego kruszywa, mikrowypełnień w postaci pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego. Popiół, jako mniej aktywne mikrowypełnienie, użyto celem osłabienia matrycy.

Wykazano, że reologia matrycy decyduje o możliwej do rozproszenia ilości włókien i że w zakresie liniowej zależności granicy płynięcia mieszanek od zawartości włókien, efekt uzbrojenia jest mały. Do wystąpienia zwielokrotnionego zarysowania wymagana zawartość włókien obejmuje zakres współdziałania między nimi podczas ścinania mieszanki, co przyspiesza wzrost parametrów reologicznych, to jest: granicy płynięcia i lepkości plastycznej. Z pogorszeniem urabialności mieszanek spada wytrzymałość f_c kompozytu, czemu odpowiada zwiększenie odkształcalności i odporności na pękanie. Warunkiem wystąpienia zwielokrotnionego zarysowania jest dostosowanie wytrzymałości matrycy do parametrów włókien z uwzględnieniem, że czynnikiem osłabiającym matrycę są też same włókna.

Stwierdzono, że niezależnie od wielkości ziaren piasku efekt uzbrojenia włóknami pogarsza się ze wzrostem jego zawartości. Najlepsze wyniki uzyskano uzbrojeniem matrycy typu zaczynów z mikrowypełnieniem.

Stwierdzono, że uzbrojenie krótkimi włóknami pozwala otrzymać kompozyt typu wysokowartościowego, jednak bez kontroli propagacji rys. Szybkość rozprzestrzeniania się spękań zmniejszono, zastępując część mikrowłókien węglowych dłuższymi włóknami szklanymi, kosztem efektu zwielokrotnionego zarysowania.

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Materiały oparte na spoiwie cementowym, ze względu na kruchość, nadają się głównie do przenoszenia naprężeń ściskających. W żelbetowych elementach, chociaż zbrojenie przenosi naprężenia rozciągające, nie eliminuje jednak podatności matrycy na spękania oraz udziału rys w degradacji betonu i korozji zbrojenia. W przeszłości możliwość ograniczenia tego zjawiska wiązano głównie ze zwiększeniem wytrzymałości betonu, w tym zwłaszcza na ściskanie. W wyniku lepszego poznania procesu hydratacji, warunków twardnienia, doboru dodatków chemicznych i domieszek mineralnych, uziarnienia kruszywa i innych zabiegów redukujących porowatość otrzymuje się betony o wytrzymałości f_c ponad 100 MPa. Wysoka wytrzymałość betonu na ściskanie i odpowiednio większa wrażliwość na zarysowania, zwiększyła prawdopodobieństwo katastroficznego pękania, bez widocznych objawów zużycia materiału. Kruchość betonów zwykłych wyrażona stosunkiem f_t/f_c waha się między 1/10 i 1/12, natomiast betonów o wysokiej wytrzymałości nie przekracza 1/20 [1,2,3]. Dlatego równoległe z rozwojem wysokowytrzymałych betonów rozwijano kompozyty cementowe zbrojone różnego rodzaju włóknami.

Pierwsze próby dozbrojenia tradycyjnych kompozytów cementowych włóknami odbywały się przy użyciu tego co dała natura: włosie końskie, włókna roślinne, włókna azbestowe. Wprowadzony do praktyki, na początku XX stulecia, sposób zwiększania odporności na kruche pękanie cienkościennych materiałów cementowych włóknami azbestowymi, utorował drogę do rozwoju technologii i materiałów odpowiadających współczesnym wymaganiom. W elementach konstrukcyjnych zbrojenie krótkimi włóknami kruchej matrycy nie traktuje się jako substytutu tradycyjnego zbrojenia ciągłego, tylko jako modyfikację otuliny. Głównym celem użycia mocnych włókien do uzbrojenia kruchej matrycy jest zwiększenie jej ciągliwości i odpowiednio wytrzymałości na rozciąganie. Włókna zmniejszając kruchość otuliny, zwiększają trwałość żelbetu. Wymagana zawartość włókien do kontroli procesu zarysowania, niezależnie od ich charakterystyki, nie przekracza 1% [4,5].

Znaczne zwiększenie odkształcalności cienkościennych elementów na spoiwie cementowym wymaga odpowiednio większej ilości uzbrojenia [6], na przykład włókien azbestowych nawet do 20% (Balaguru i Shah 1992). Dostępność azbestowych włókien, ich względnie niska cena powodowała, że o stosowanej ilości decydowała głównie możliwość ich rozproszenia w matrycy cementowej [7].

Stopniowe ograniczanie stosowania włókien azbestowych, uwarunkowane względami zdrowotnymi, zdecydowało o rozwoju technologii otrzymywania i stosowania innych włókien [8]. Z wielu dostępnych włókien: stalowe, szklane, węglowe, kewlarowe, polimerowe w tym polipropylenowe, nylonowe i inne [5,7], najczęściej stosuje się: stalowe, szklane, polimerowe i węglowe. Wszystkie mają zalety i wady, przy czym najwięcej zalet mają węglowe. Stalowe trudno się rozpraszają, utrudniają wykończenie i powodują pojawianie się rdzy na powierzchni elementów. Szklane, poza drogimi alkalioodpornymi, ulegają korozji w matrycach cementowych [7]. Włókna węglowe o dużej odporności chemicznej, termicznej, dobrych właściwościach mechanicznych są hydrofobowe, a przez to trudne do rozproszenia i są kosztowne.

Z dwóch typów włókien węglowych: niskomodułowe „pitch” i wysokomodułowe PAN, kilkakrotnie mniejsza cena niskomodułowych, decyduje o ich szerszym stosowaniu w materiałach budowlanych.

Pierwsze praktyczne zastosowanie kompozytu cementowego HPFRC (ang. High Performance Fiber Reinforced Composite, rys.2.1), w postaci płyt elewacyjnych zbrojonych niskomodułowymi włóknami węglowymi, miało miejsce w 1983 roku w AL Shaheded Monument w Bagdadzie (Irak). W Tokio wykonano podobną elewację budynku Ark-Mori, wybudowanym w 1986 (Ohama [9]) i kolejno w wielu innych (Marikunte i Shah [5]). Uzyskano w ten sposób znaczne zmniejszenie zużycia materiałów, ciężaru własnego konstrukcji i kosztów utrzymania.

Zakres zastosowań kompozytów HPFRC stale się zwiększa i obejmuje elementy o dużej trwałości i względnie małej masie: ściany osłonowe, pokrycia dachowe (lżejsze od innych w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, mniej podatne na niszczenie naroży przy podawaniu i układaniu), różnego rodzaju płytki o dużej odporności na działanie spiętrzonych naprężeń, masy do napraw konstrukcji betonowych, posadzki w pracowniach komputerowych, fundamenty pod maszyny, przęsła i płyty mostów, słupy transmisyjne, absorbenty dla różnego rodzaju fal itp., oraz zbrojone włóknami węglowymi lekkie wapniowo-krzemianowe płyty niepalne, wolne od azbestu stosowane jako substytuty drewna.

Kompozyty typu FRC (ang. Fiber Reinforced Composites, rys.2.1) i HPFRC są dużym osiągnięciem, z jednej strony ze względu na rozwój technologii obejmujących matrycę, włókna i same procesy wytwarzania kompozytów z drugiej, badań zwiększających zrozumienie na makro i mikro poziomie podstawowych mechanizmów kontrolujących zachowanie włókien w matrycy cementowej. Technologie wytwarzania FRC i HPFRC

pozwalają na częściowe wykorzystanie istniejących zakładów prefabrykacji bez dodatkowych urządzeń.

W większości prac aplikacyjnych dotyczących HPFRC, uwaga koncentruje się głównie na relacji wytrzymałość-odporność na pękanie. Prace badawcze ukierunkowane są głównie na poznanie warunków, których spełnienie jest niezbędne do otrzymania kompozytów typu HPFRC. Jednym z istotniejszych, jest jednorodne rozproszenie niezbędnej ilości włókien w matrycach o względnie małym w/c. Ilość włókien i stosunek ich długości do średnicy (parametr (L/d)), powinny być tak duże, jak tylko jest to możliwe [10]. Stosunek L/d determinuje opór wywlekania włókien z matrycy, natomiast efekt uzbrojenia rośnie ze wzrostem zawartości włókien i parametru L/d . Wpływ włókien na urabialność jest głównym czynnikiem ograniczającym L/d i ilość jaką można, bez specjalnych urządzeń, jednorodnie rozproszyć w określonej matrycy. W praktyce możliwy jest tylko kompromis między właściwościami reologicznymi świeżych mieszanek i poprawą właściwości mechanicznych kompozytu.

Z dotychczasowych prac wynika, że związek między reologią matrycy a reologią mieszanki z włóknami nie był przedmiotem szczegółowych badań. W materiałach z monotematycznych konferencji na temat HPFRC zwraca uwagę fakt, że niewiele wniosków o charakterze ogólnym wyciągnięto na ten temat z wcześniejszych badań, i że najwięcej rozwojowych prac wykonano w oparciu o metodę prób i błędów [7].

W pracy podjęto próbę wykazania zależności parametrów reologicznych mieszanek cementowych typu zapraw i zaczynów bez i z włóknami węglowymi typu „pitch”, z ich właściwościami mechanicznymi, do uproszczenia postępowania przy wyznaczaniu niezbędnej zawartości włókien w celu uzyskania materiału o wysokiej odporności na pękanie.

2. Omówienie stanu wiedzy na podstawie literatury

2.1 Tradycyjne i wysokowartościowe kompozyty cementowe

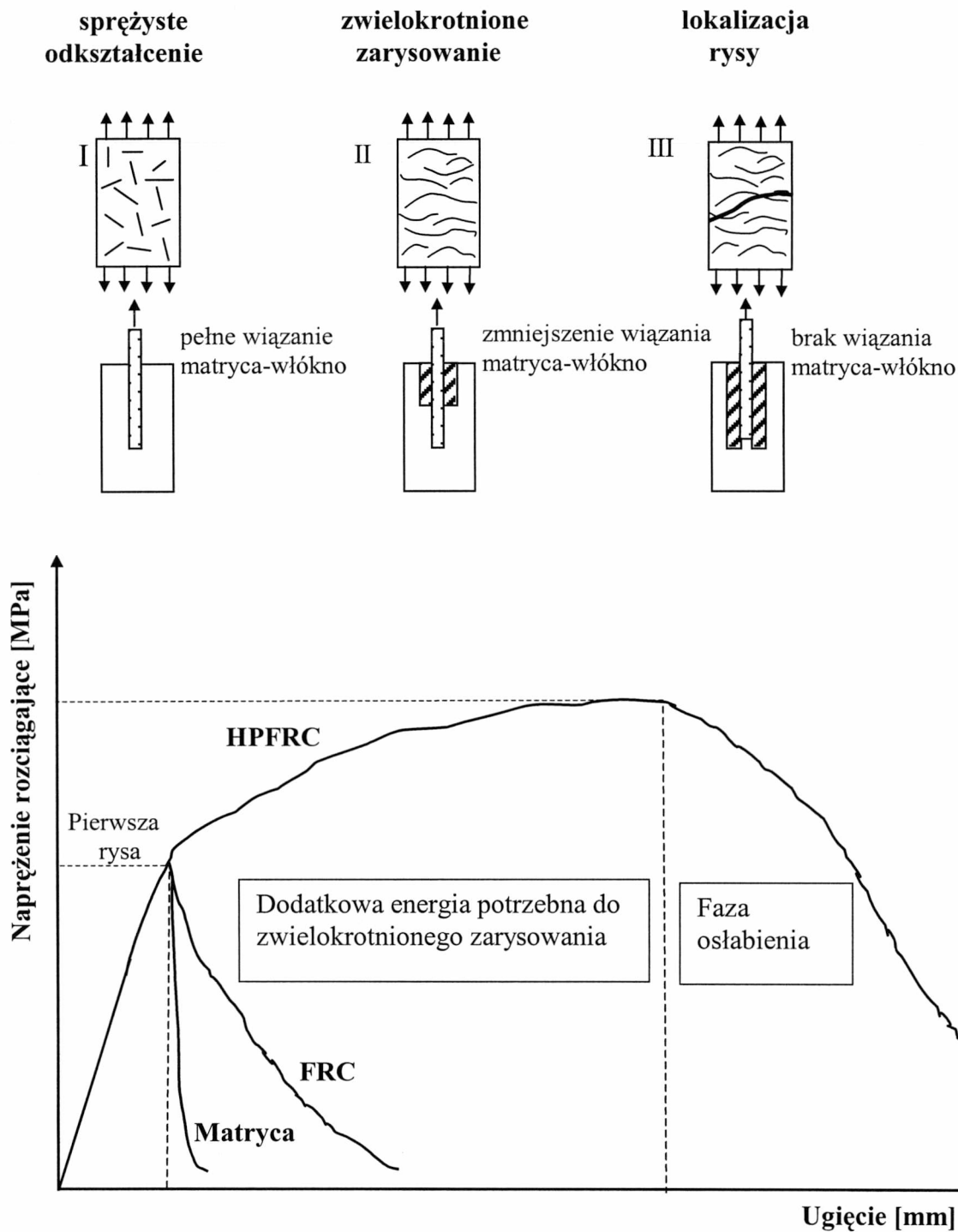
Celem użycia krótkich, mocnych włókien do uzbrojenia kruchej matrycy cementowej jest zwiększenie odporności materiału na kruche pękanie. W początkowym okresie włókna stosowano głównie ze względu na możliwość kontroli propagacji rys [7,11,12].

Poznanie zachowania się pod obciążeniem kompozytów z rozproszonym uzbrojeniem, dostarczyło podstaw do podziału ich na dwie grupy, rys.2.1: tradycyjne kompozyty cementowe zbrojone włóknami (FRC, ang. Fiber Reinforced Composites) oraz wysokowartościowe kompozyty cementowe zbrojone włóknami (HPFRC, ang. High Performance Fiber Reinforced Composites), [13]. Ze względu na brak jednoznacznych pojęć w języku polskim, w dalszej części pracy stosowano terminologię anglojęzyczną.

Jak wynika z rys.2.1 do obciążenia krytycznego wywołującego pierwsze zarysowanie, włókna nie zmieniają liniowego zakresu odkształceń. Różnice występują po zarysowaniu:

- matryca bez włókien, po przekroczeniu granicznego obciążenia ulega katastroficznemu zniszczeniu,
- przy niewielkiej zawartości włókien (FRC), po przekroczeniu obciążenia krytycznego (i maksymalnego), energia zużywana jest na wywlekanie włókien, zmniejsza się szybkość propagacji rysy,
- przy odpowiednio większej zawartości włókien, to jest takiej, przy której średnie odległości między włóknami w kompozycie są mniejsze od krytycznej długości rysy w danej matrycy, pojawia się właściwość przenoszenia zwiększonych obciążeń po zarysowaniu, związana z absorpcją energii zwielokrotnionym zarysowaniem, rys.2.1. Wzmacnianie kompozytu odkształceniem jest główną cechą HPFRC [14,15,16,17].

Wykres naprężenie-ugięcie dla HPFRC dzieli się na trzy części, rys.2.1. Pierwsza, podobnie jak w FRC, obejmuje zakres sprężysty, który może być zdefiniowany przez moduł sprężystości. Druga, nieliniowe odkształcenie pomiędzy naprężeniem krytycznym (pierwszym zarysowaniem) a wytrzymałością na rozciąganie - wzmocnienie odkształceniem wywołanym wzrostem liczby rys (zwielokrotnionym zarysowaniem). Trzeci obszar, po osiągnięciu wytrzymałości, traktowany jest jako dodatkowa energia potrzebna na zniszczenie próbki, związana z odspajaniem i wyciąganiem włókien z matrycy. W obszarze tym następuje lokalizacja i propagacja rysy (osłabienie kompozytu).



Rys.2.1 Wykres napężenie-ugięcie matryc, kompozytów zwykłych (FRC) i wysokowartościowych (HPFRC), na podstawie [11,13]

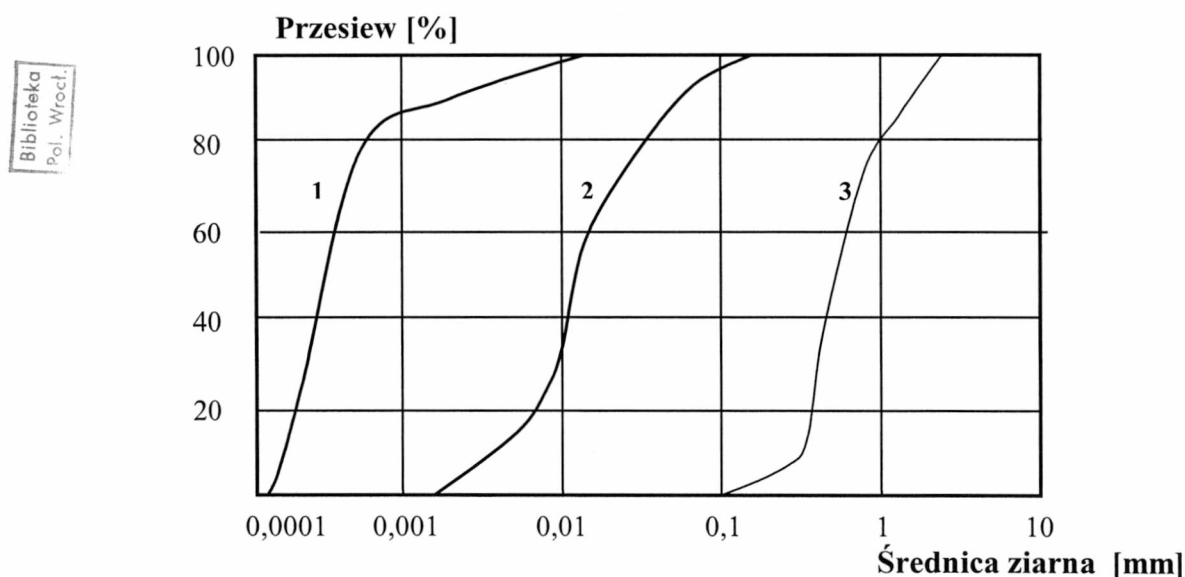
2.1.1 Podstawowe składniki matrycy

Cement, dodatki i domieszki

W kompozytach HPFRC zalecane jest stosowanie cementu portlandzkiego dobrej jakości, w ilości przekraczającej 400 kg/m^3 , o dużej zawartości C_3S i C_2S oraz niewielkiej C_3A [7]. Zawartość cementu może być redukowana przez podstawienie innymi mikrowypełniaczami, takimi jak: pył krzemionkowy czy popiół lotny [18,19]. Uważa się, że w idealnej strukturze kamienia cementowego niezhydrytowane ziarna cementu powinny być maksymalnie upakowane, z niewielką zawartością fazy żelowej i dużych kryształów $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Podstawowymi dodatkami są superplastyfikatory i mikrowypełniacze [20,21,22,23]. Superplastyfikatory poprawiają urabialność świeżych mieszanek cementowych o małym w/c. Najczęściej są to sole sodowe sulfonowanych polikondensatów formaldehydu z naftalenem lub melaminą, posiadające właściwości dyspergujące, smarne i zmniejszające napięcie powierzchniowe wody. Zawartość upłynniaczy stosowanych do rozproszenia włókien w mieszankach, nie przekracza 2-4% masy cementu [24,25,26].

Mikrowypełniacze, takie jak popiół lotny czy pył krzemionkowy zwiększają gęstość i urabialność mieszanek, zmniejszając segregację składników. Zawartość ich jest różna i najczęściej nie przekracza 15% masy cementu. Rozkład uziarnienia pyłu krzemionkowego wskazuje, że większość ziaren jest mniejsza od $1 \mu\text{m}$, średni ich wymiar wynosi około $0,3 \mu\text{m}$, w przybliżeniu o dwa rzędy mniejszy od średniego wymiaru ziarna cementu, rys.2.2.

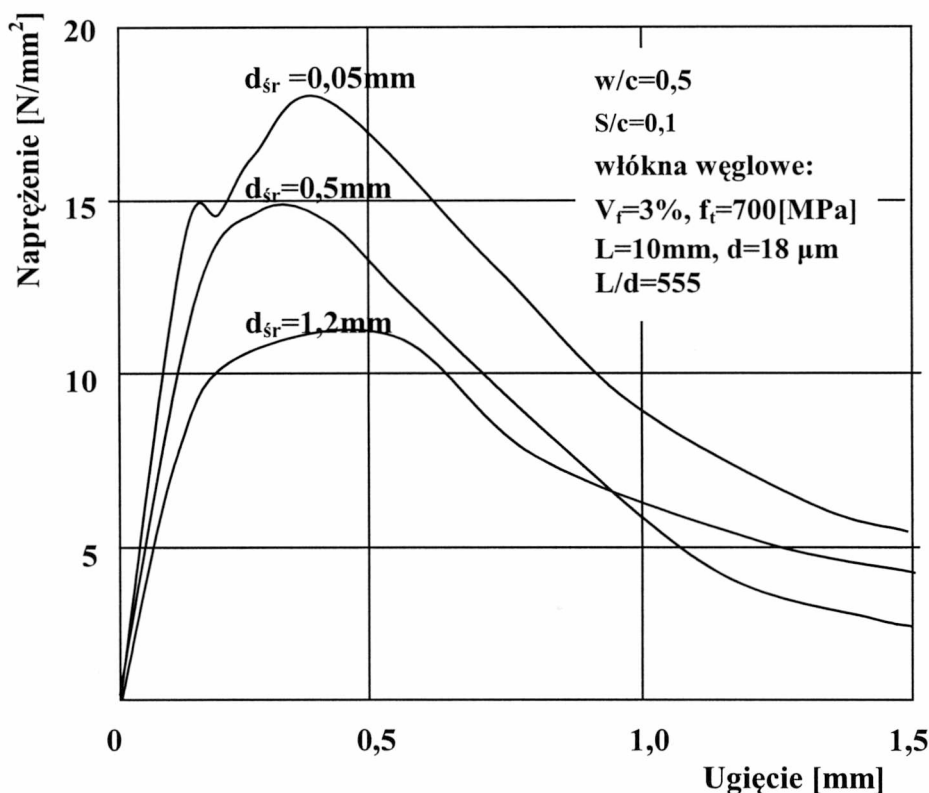


Rys.2.2 Rozkład wielkości ziaren składników wysokowytrzymałej zaprawy:
1-pył krzemionkowy; 2-cement; 3-piasek 0/3, na podstawie [27]

Kruszywo

Z badań wpływu składu ziarnowego wynika, że ciągły rozkład wielkości ziaren kruszywa jest ważnym wymogiem dla HPFRC nie tylko w odniesieniu do kruszywa, ale do całego składu. Ziarna o sferycznej budowie są bardziej zalecane od ziaren rozkruszonych.

Jak wynika z badań Nishioka [28], napężenie maksymalne i pierwszego zarysowania w próbie zginania FRC, zwiększa się wraz ze zmniejszeniem ziaren piasku, rys.2.3. Podobnie wytrzymałość na rozciąganie zmniejsza się ze wzrostem wielkości drobnego kruszywa. Do rozmieszczenia włókien między ziarnami kruszywa, optymalna ich wielkość nie może przekraczać długości włókien. Zwiększenie wielkości ziaren kruszywa i jego zawartości, zmniejsza jednorodność rozproszenia włókien, co pogarsza efekt uzbrojenia, rys.2.3.

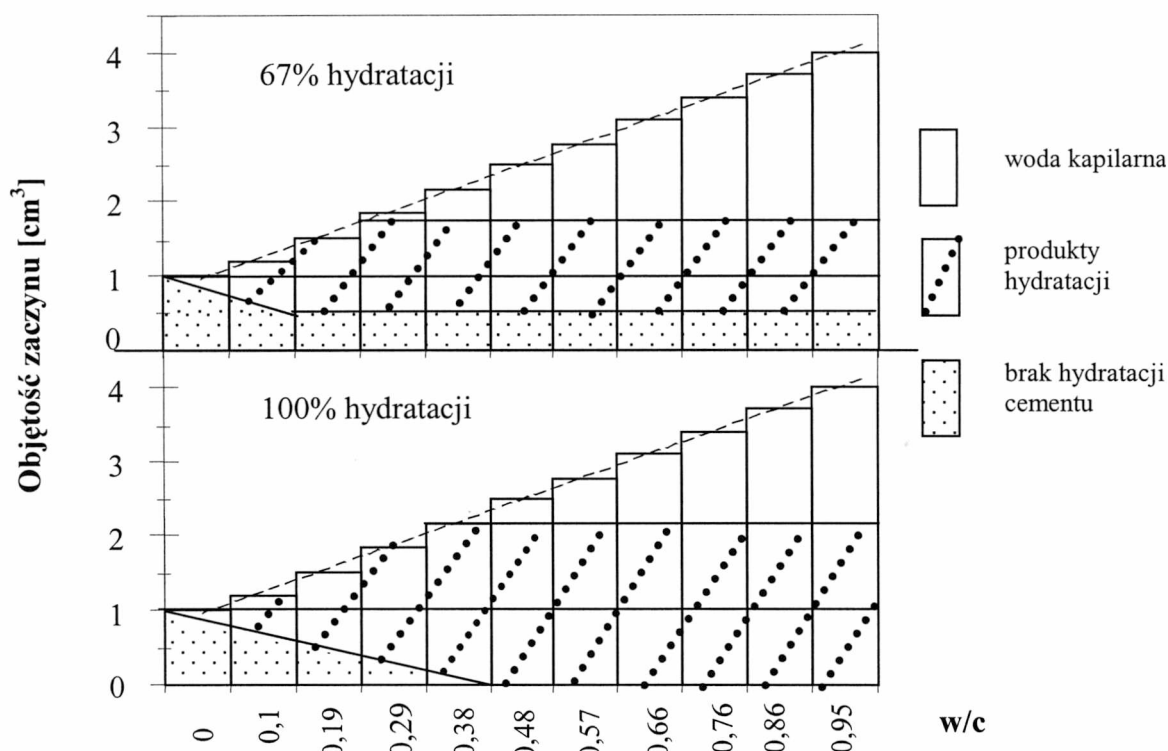


Rys.2.3 Wpływ wielkości ziaren piasku na zachowanie się zapraw w próbie zginania przy średnim ziarnie $d_{sr}=0,05; 0,5; 1,2\text{ mm}$, Nishioka i inni [28]

Wskaźnik wodno-cementowy, w/c

Jak wynika z pracy [7] $w/c \approx 0,4$ jest granicą podziału między betonami tradycyjnymi a wysokowytężnymi. W wielu publikacjach w/c betonów wysokowytężnych jest mniejsze i waha się między 0,3–0,35, natomiast bardzo wysokowytężnych stosunek ten wynosi 0,25–0,3 [29]. Wartość $w/c = 0,33$, przyjmuje się jako graniczną dla całkowitej hydratacji cementu i uwodnienia utworzonego żelu, a największy skurcz stwierdzono przy $w/c=0,3$ [30,76]. Wykazano, że przy małym $w/c < 0,33$, niezhydratyzowane ziarna cementu pełnią funkcję mikrowypełnienia wzmacniając strukturę spoiwa, rys.2.4. Im mniejsze w/c , tym więcej pozostaje niezhydratyzowanych ziaren, powodujących zmiany właściwości kompozytów w czasie większym niż 28 dni.

W kompozytach cementowych uzbrajanych włóknami, ilość wprowadzanej wody jest kompromisem między przyrostem wytrzymałości a prawidłowym rozproszeniem uzbrojenia.



Rys.2.4 Zaczyn cementowy w różnych etapach hydratacji [31]

2.1.2 Rodzaje włókien i ich charakterystyka

Głównym celem użycia włókien do uzbrojenia materiałów kruchych jest zwiększenie ich odkształcalności, związanej z nią odporności na kruche pękanie i odpowiednio wytrzymałości na rozciąganie. Stwierdzenie wpływu rozmiarów włókien na zachowanie się kompozytów cementowych uzbrojonych włóknami azbestowymi podczas rozciągania, przy ograniczeniu ich stosowania, zwiększyła zainteresowanie innymi włóknami.

W tabelicy 2.1 przedstawiono rodzaje i charakterystyki włókien stosowanych do uzbrojenia materiałów na spoiwie cementowym. Z podanego zestawienia wynika, że włókna otrzymywane sztucznie istotnie różnią się wielkością od azbestowych, a powszechnie stosowane ilości stalowych (1%obj.) nie mogą mieć znaczącego wpływu na f_t fibrobetonów.

Mostkowanie mikropęknięć matrycy i zwiększenie f_t kompozytu uwarunkowane jest odległością między rozproszonymi w nim włóknami i jest tym większe, im większa jest ich liczba w jednostce objętości kompozytu (Betterman, Ouyang i Shah [32]).

Tablica 2.1 Rodzaje, podstawowe parametry i właściwości włókien stosowanych do zbrojenia materiałów na spoiwie cementowym [5,33,34]

Parametry, właściwości Rodzaj	Średnica d [μm]	Długość L [mm]	Stosunek L/d	Gęstość [Mg/m ³]	Wytrż. na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Krytycz. wydl. [%]	Liczba włók. N* [N/cm ³]
węglowe-pitch (niskomodulowe)	14,5-18	3-12	>200	1,63	590-830	30	0,9-2,4	20200
węglowe-PAN (wysokomodulowe)	6-10	3-6	>500	1,78-1,9	2900-4200	230	1,6-1,8	118000
azbestowe	0,02-25	1-5	>200	2,6	3000-3500	60-180	2-3	3,18x10 ⁸
polipropylenowe	18	10-25	550-1400	0,9	320	1,41	8-10	3300
szklane (alk. odp.)	13-20	>6	>500	2,6	2000-4000	70-80	2,0-3,5	-
celulozowe	20-120	-	-	1,54	300-500	24-40	-	-
stalowe (mikrowł.)	150	3-6	20-40	7,85	600	210	0,5-4	94
stalowe	250-600	25-60	100	7,85	1100	210	0,5-4	2,65
Poliwinyłowe-PVA	12-41	4-12	290-330	1,3	1000-1270	26-28	2-8	3200

*N-liczba włókien w jednym cm³ matrycy kompozytu zawierającego 1% obj. włókien

Jak wynika z tab.2.1 przy zawartości włókien $V_f=1\%$ w 1 cm^3 kompozytu liczba włókien stalowych wynosi około 2,65, niskomodulowych węglowych 20200, natomiast azbestowych ponad 10^8 . Tłumaczy to znaczne różnice w zdolności do kontroli lokalizacji mikrorys i propagacji spękań przez poszczególne rodzaje włókien (Kucharska, Brandt [33]).

Każdy rodzaj włókien posiada zalety i wady. Ze stosowanych w materiałach cementowych: stalowe, szklane, celulozowe, polimerowe, węglowe i wcześniej azbestowe, najwięcej zalet mają włókna azbestowe i węglowe [34,35]. Włókna stalowe, ze względu na wielkość trudno się rozpraszają, utrudniają wykończenie i powodują pojawienie się rdzy na powierzchni, co ogranicza ich stosowanie w elementach zewnętrznych. Szklane, nazywane alkalioodpornymi (zawierają co najmniej $17\% \text{ ZrO}_2$), tracą jednak stopniowo wytrzymałość i ciągliwość w wyniku starzenia. Oznaki degradacji stwierdzono po 10 latach pracy kompozytu [35]. Włókna polimerowe posiadają bardzo dużą wytrzymałość na rozciąganie, ale większość z nich ma stosunkowo mały moduł sprężystości. Dużą zaletą włókien celulozowych jest poprawa właściwości izolacji termicznej oraz stosunkowo niska cena, a wadą brak odporności na działanie wilgoci. Włókna azbestowe charakteryzują doskonałe właściwości mechaniczne, technologiczne oraz dostępność i cena, jednak ze względu na wymiary, trwałość i związaną z tym kancerogenność przestały być stosowane.

Włókna węglowe

Włókna węglowe oprócz małej gęstości, dużej odporności na temperaturę i oddziaływanie chemiczne charakteryzuje słaba zwilżalność oraz kruchość. Jednak główną ich wadą jest wysoka cena. Jak wynika z tab.2.1 dostępne na rynku są dwa rodzaje włókien węglowych: PAN i „pitch”. Włókna typu PAN otrzymuje się w procesie wysokotemperaturowego uwęglania włókien poliakrylonitrylowych. Włókna te charakteryzują się modułem sprężystości zbliżonym do stali i trzykrotnie większą wytrzymałością na rozciąganie. Duża trwałość, niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, przewodnictwo elektryczne przy jednocześnie bardzo wysokiej cenie, ogranicza ich stosowanie głównie do specjalnych celów. Włókna PAN wytwarzane są od początku lat sześćdziesiątych i z nimi wiąże się rozwój zaawansowanych technologii kompozytów (konstrukcje lotnicze i kosmiczne, pojazdy drogowe i jednostki pływające, sprzęt sportowy, filtry, ubrania, szczotki antystatyczne itp. [37]). W budownictwie po raz pierwszy włókna PAN użyto w 1987 roku do produkcji lekkich materiałów ściennych, przy budowie 37 piętrowego wieżowca w Japonii [38].

Niskomodułowe włókna węglowe o względnie małej wytrzymałości na rozciąganie typu „pitch” (tab.2.1) otrzymuje się z węgla i pozostałości po destylacji ropy naftowej (keku). Produkcję ich rozwinięto w pierwszej połowie lat 80-tych (Ohama [10]). Mimo, że niskomodułowe włókna były dużo tańsze od włókien typu PAN, ze względu na problemy z rozproszaniem i skłębianiem się w matrycach cementowych, stosowano je rzadko. Stosunkowo niska cena, 7-10 razy mniejsza od wysokomodułowych PAN (w 1995 roku cena włókien „pitch” firmy Kureha Ltd. w Europie wynosiła 40 DM/kg) oraz rozwój technologii kompozytów, zadecydowały o użyciu tych włókien do ubrojenia materiałów cementowych stosowanych w budownictwie (tab.2.2). Według prognoz ich cena będzie się zmniejszać [33].

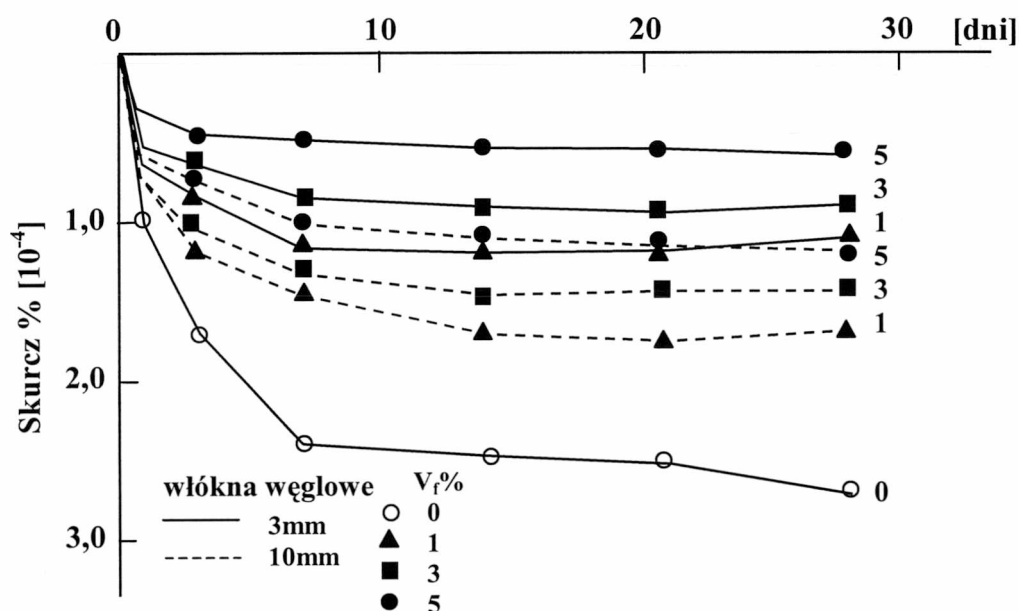
Znaczny koszt tego rodzaju uzbrojenia powoduje, że prace badawcze nad optymalnym wykorzystaniem właściwości włókien typu „pitch” w materiałach budowlanych koncentrują się głównie na poznaniu mechanizmów wzmocnienia kompozytów cementowych z rozproszonym uzbrojeniem oraz minimalnej niezbędnej ilości włókien umożliwiającej uzyskanie zamierzonych efektów, z uwzględnieniem składu matryc, a także czynnikach determinujących jednorodność rozproszenia uzbrojenia w kompozycie.

Największymi producentami włókien węglowych są firmy: w Japonii Toray, Toho, Kureha Chemical i Mitsubishi Rayon, w U.S.A Hercules, Amoco, w Anglii Courtaulds, w Niemczech Basf, Sigri, we Francji Serofim.

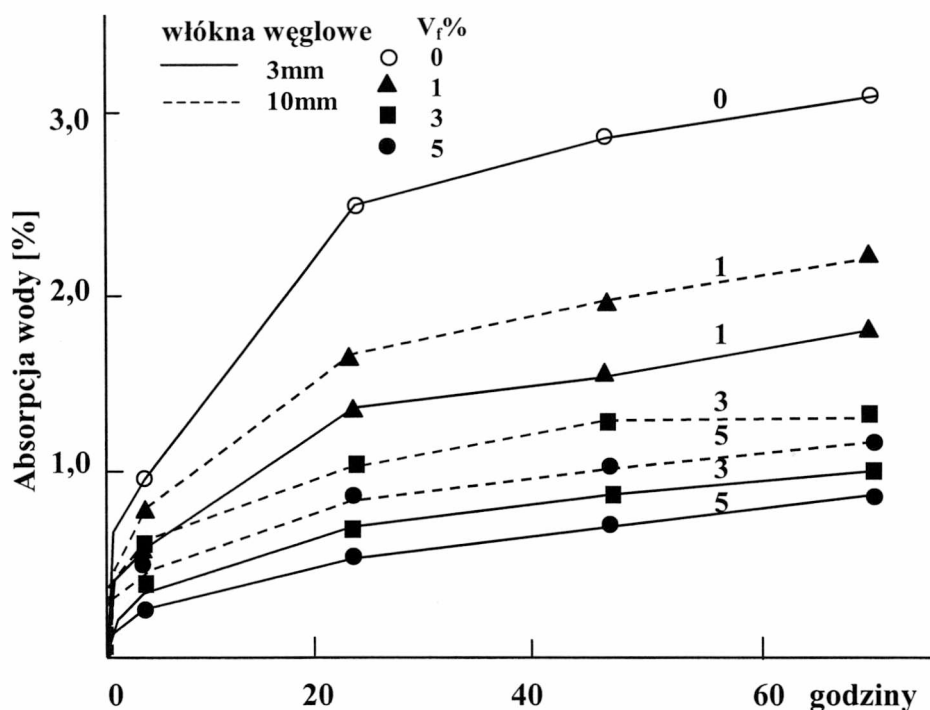
Tablica 2.2 Podstawa i zakres stosowania włókien węglowych typu „pitch” w materiałach budowlanych [39,40,41]

Zalety kompozytów	Zastosowania
Odporność na działanie czynników chemicznych, kompatybilność ze środowiskiem alkalicznym.	Naprawy ubytków w konstrukcjach betonowych.
Podwyższona wytrzymałość na zginanie, odporność na kruche pękanie oraz stosunkowo mały ciężar.	Materiały cienkościenne: rury i kształtki, płyty elewacyjne, dachówki, płyty do krycia dachów, ekrany akustyczne, podwójne podłogi, panele, detale architektoniczne.
Dobre tłumienie drgań przy wysokiej wytrzymałości i odporności na zmęczenie.	Konstrukcje betonowe narażone na drgania: fundamenty pod maszyny, podkłady kolejowe.
Odporność na temperaturę i środowisko kwaśne.	Konstrukcje betonowe narażone na oddziaływanie środowisk agresywnych i cyklicznych zmian temperatury.
Elementy konstrukcyjne nie zaburzające pola magnetycznego.	Podłogi, nawierzchnie, ściany.

Z badań nad kompozytami uzbrojonymi włóknami węglowymi o różnej długości wynika, że przy mniejszej długości włókien 2-6mm i większej ich zawartości, zdecydowanie zmniejsza się skurcz i absorpcja wody (Katz, Bentur, [42]). Podobne efekty uzyskano przy dodaniu włókien o długości 3mm, rys.2.5 i 2.6 (Ohama [10]).



Rys.2.5 Wpływ niskomodulowych włókien węglowych na skurcz HPFRC w funkcji czasu [10,43]



Rys.2.6 Absorpcja wody w próbkach HPFRC, Ohama [10]

Włókna szklane

Do uzbrajania kompozytów cementowych stosowane są włókna szklane o podwyższonej odporności na alkalia [44]. Produkcja ciągłych włókien szklanych następuje w procesie wyciągania z dysz (metoda Owens-Corning). Z pojedynczych włókien elementarnych o średnicy 13-20 mikrometrów tworzy się pasmo cięte do wybranej długości, najczęściej 6, 12 lub 24 mm. Wytrzymałość na rozciąganie pasm włókien przekracza o trzy rzędy wytrzymałość zaprawy cementowej, co w połączeniu z dobrą przyczepnością do zaprawy decyduje o ich przydatności w uzbrajaniu matryc cementowych.

Powszechne zastosowanie włókien szklanych w matrycach opartych na cementach glinowych nastąpiło w latach 60-tych w Rosji i w Chinach (Biryukovich [45]). Wprowadzenie włókien alkalioodpornych umożliwiło zastosowanie ich w matrycach z cementem portlandzkim, GRC (ang. Glass-Fibre Reinforced Cement Composites).

Szerokie zastosowanie kompozytów cementowych z włóknami szklanymi obejmuje [100]:

- pokrycia dachowe, dachówki, rury,
- elementy ścian budynków (panele osłonowe, ocieplające, dekoracyjne ekrany akustyczne),
- posadzki i nawierzchnie w budynkach i halach,
- podłogi podniesione (tzw. podwójne),
- osłony termiczne i przeciwuderzeniowe,
- naprawy (torkretowanie),
- detale architektoniczne.

Współcześnie kompozyty GRC wykorzystywane są w budowlanych elementach nienośnych, odpornych na temperaturę, wilgoć czy wiatr. W krajach wysokorozwiniętych stosowane są konstrukcje z paneli GRC na rusztach metalowych, wykorzystywane w elewacjach budynków wysokich [46]. Dobre właściwości tych włókien w połączeniu z ich stosunkowo niską ceną powodują, że są obecnie najczęściej wykorzystywane w uzbrajaniu matryc cementowych.

2.1.3 Procesy technologiczne

W zależności od składu matrycy, ułamka objętościowego włókien i metody wytwarzania wyróżnia się następujące kompozyty i technologie:

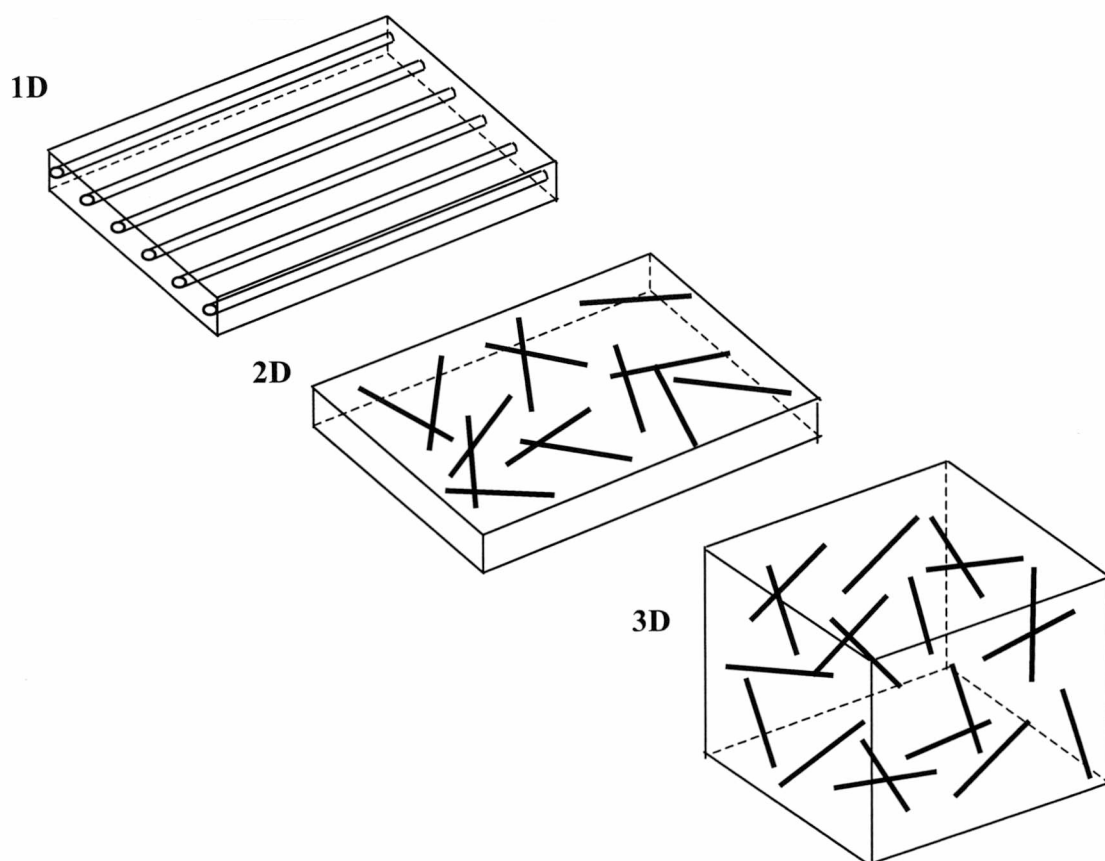
Kompozyty [6]

- typu betonów: włókna stalowe $V_f = 0,4-2\%$ (elementy o dużych gabarytach). Włókna polipropylenowe $V_f = 0,06-0,5\%$ (posadzki, elementy masywne). SIFCON (ang. Slurry Infiltrated Fiber Concrete) - kompozyty z dużą zawartością włókien stalowych $V_f = 4-20\%$,
- typu zapraw : zawartość włókien $V_f = 1-5\%$ (arkusze uzbrojone włóknami szklanymi, płyty i płytki zbrojone naturalnymi i polimerowymi włóknami),
- typu zaczynów: zawartość włókien $V_f = 4-10\%$, w przypadku azbestowych do 20% (stos. również z niewielką ilością drobnego kruszywa, specjalne technologie „Hatschek”- arkusze, płyty i płytki na elewacje i do krycia dachów).

Technologie do wytwarzania uzbrojonych kompozytów cementowych [44,47]

- mieszanie w mieszadłach (ang. Premix Process): wpływ włókien na reologię ogranicza ilość dodanych włókien (V_f stalowych do 2%, propylenowych do dziesiątych %),
- natryskiwanie (ang. Spray-up Process): w przypadku włókien szklanych natryskuje się jednocześnie zawieszinę i włókna na powierzchnię formowania przy produkcji arkuszy (możliwość wprowadzenia do 6% V_f),
- torkretowanie (ang. Shotcreting): zmodyfikowana technika polegająca na natrykiwaniu, stosowana przy budowie tuneli i stabilizowania pochyłego terenu (metoda pozwala na wprowadzenie dużej ilości włókien),
- ręczne nakładanie (ang. Hand lay up): fabrycznie formowane maty z włókien układane w formach, impregnowane zaczynem cementowym i następnie zagęszczane wibrowaniem lub prasowaniem (wyroby o dużej zawatości włókien),
- procesy ciągłe (ang. Continuos Production process): maty z włókien impregnowane zaczynem w sposób ciągły, przesuwaniem się przez wanny z zaczynem, następnie zwijane i prasowane w złożone kształty, dając wyroby o zawartości do 15% V_f ,
- wytłaczanie (ang. Exttrusion process): przetłaczane mieszanki przez ustnik o różnych kształtach i wymiarach. Jest to proces ciągły i ekonomiczny do otrzymywania kompozytów cementowych o ulepszonych właściwościach.

Na właściwości kompozytów znaczący wpływ, oprócz zawartości i jednorodności rozproszenia włókien, ma sposób ich rozmieszczenia. Wyróżnia się trzy podstawowe sposoby ułożenia włókien: równoległe i przypadkowo rozproszone w płaszczyźnie 1D i 2D lub w przestrzeni 3D, rys.2.7.



Rys.2.7 Orientacja włókien: 1D – ułożone w jednym kierunku, 2D –rozmessezone w dwóch kierunkach, 3D – rozproszone w trzech kierunkach

Jeżeli uzbrojenie w kompozycie zorientowane jest równoległe do kierunku obciążenia (1D) to zgodnie z prawem mieszanin, proporcjonalnie do udziałów, wytrzymałość na rozciąganie jest sumą wytrzymałości włókien i matrycy. Pracochłonność i czasochłonność przy układaniu włókien w jednym kierunku powodują, że w kompozytach cementowych częściej stosuje się rozmieszczenie rozproszone. Ze względu na występowanie głównych naprężeń w różnych kierunkach, najbardziej celowe jest równomierne rozmieszczenie w płaszczyźnie lub przestrzeni (2D lub 3D). Dotychczasowe badania jednoznacznie wskazują na większy efekt w kompozytach z jednorodnie rozmieszczonym uzbrojeniem [48].

2.1.4 Zastosowania w budownictwie

Podstawowe korzyści wynikające z uzbrojenia matryc włóknami to poprawa odkształcalności, uderzalności, tłumienia drgań, zmniejszenie kruchości oraz ciężaru własnego wykonanych konstrukcji [49,50,51]. Zalety modyfikacji kompozytów wysokowartościowych wyznaczają wciąż nowe obszary ich wykorzystania, do których należą, rys.2.8:

Lekkie konstrukcje betonowe:

- mocno obciążone nawierzchnie komunikacyjne: chodniki, podłogi,
- nawierzchnie lotnisk, parkingów,
- prefabrykaty betonowe: rury, kręgi, cienkie płyty, panele, faliste arkusze oraz dachówki.

Konstrukcje, gdzie wymagane są podwyższone właściwości budowlne:

- tereny sejsmiczne,
- fundamenty pod maszyny,
- reaktory nuklearne,
- budowle o podwyższonej odporności na temperaturę,
- budowle hydrotechniczne,
- budowle smukłe, zwłaszcza na terenach sejsmicznych,
- konstrukcje narażone na oddziaływania dynamiczne,
- drogi ewakuacyjne,

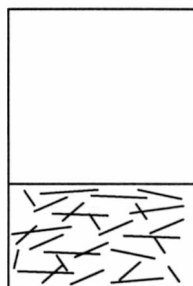
Nowe konstrukcje w połączeniu z tradycyjnymi żelbetowymi, w tym również sprężonymi:

- budynki wysokościowe,
- mosty o dużej rozpiętości,
- masywne konstrukcje,
- różnego rodzaju powłoki zabezpieczające.

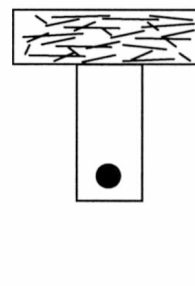
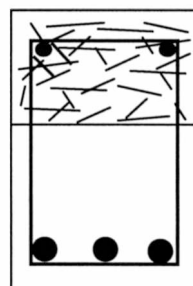
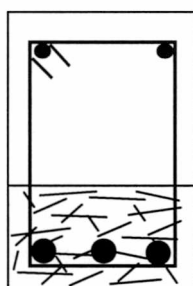
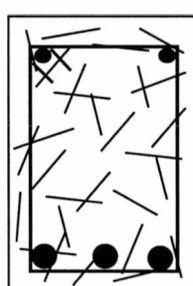
Naprawy, wzmocnienia i rekonstrukcje kompozytów cementowych:

- belki, dźwigary, płyty, nawierzchnie mostów,
- wzmacnianie tuneli i osuwisk,
- naprawa betonu.

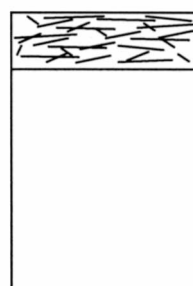
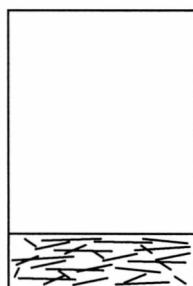
Zastosowania HPFRC w konstrukcjach betonowych



Zastosowanie HPFRC w konstrukcjach żelbetowych ze zbrojeniem ciągłym i sprężonym



Zastosowanie HPFRC do napraw i rekonstrukcji kompozytów betonowych



belki, dźwigary, płyty

nawierzchnie mostów

belki, dźwigary



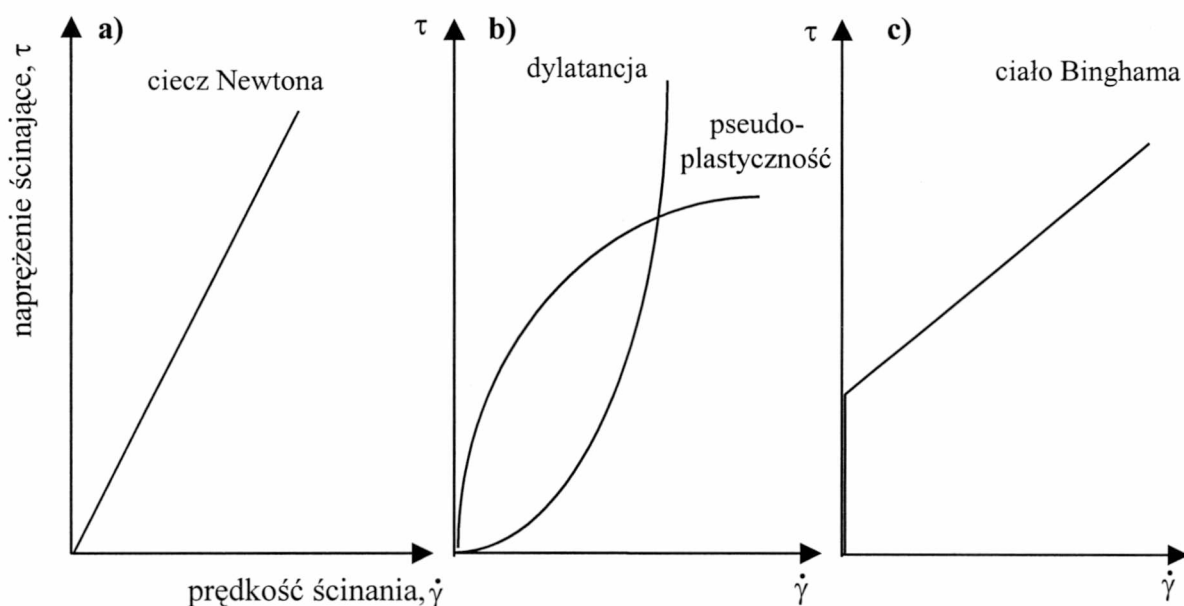
kolumny

Rys.2.8 Możliwe zastosowania HPFRC [13]

2.2 Właściwości reologiczne mieszanek cementowych

2.2.1 Reologia mieszanek cementowych

Zachowanie reologiczne mieszanek określają krzywe płynięcia, to jest zależność między naprężeniem ścinającym τ a prędkością ścinania $\dot{\gamma}$, rys.2.9 i 2.10. Na podstawie krzywych odróżnia się ciecze newtonowskie (rys.2.9.a) od nie newtonowskich (rys.2.9.b i c).



Rys. 2.9 Krzywe płynięcia: a) cieczy Newtona
b) cieczy wykazujących dylatację, pseudoplastyczność
c) ciała Bingham

Liniową zależność między naprężeniem ścinającym a prędkością ścinania, opisuje równanie Newtona (2.1):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{równanie Newtona} \quad (2.1)$$

gdzie: τ - naprężenie ścinające [Pa],
 η - lepkość [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\dot{\gamma}$ - prędkość ścinania [s^{-1}].

Ciecze, których lepkość zależy od prędkości ścinania (nieliniowo lepkie) opisuje zależność (2.2):

$$\tau = A \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

gdzie:

n - miara: $n < 1$ pseudoplastyczności, $n > 1$ dylatacyjności,
 A - miara konsystencji (dla $n=1$, $A=\eta$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$]).

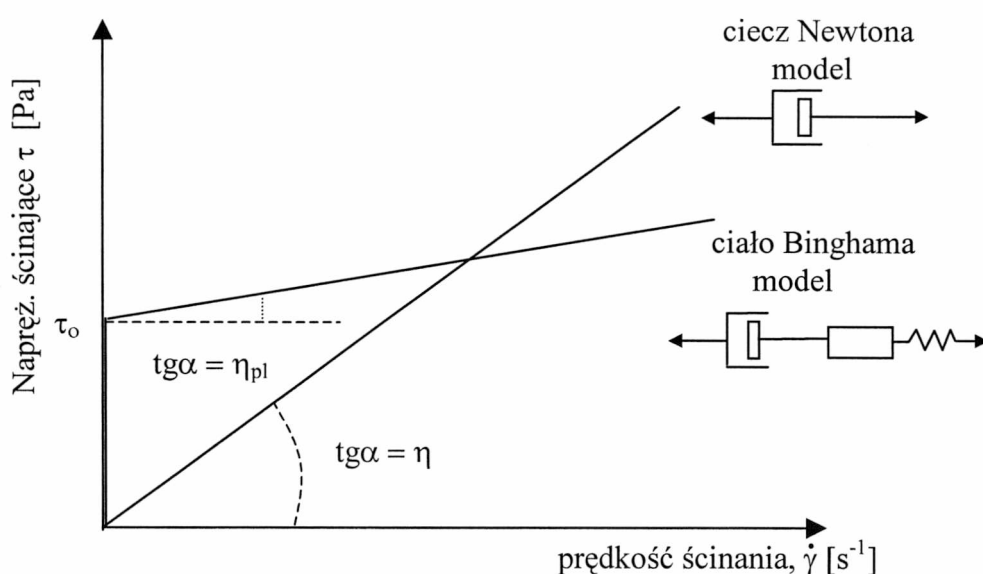
Ciecze, których opór maleje ze wzrostem prędkości ścinania ($n < 1$) upłynniają się pod wpływem ścinania, nazywane są pseudoplastycznymi, natomiast te, których opór wzrasta – dylatacyjnymi ($n > 1$).

Zawiesiny z ciał stałych w cieczy takie jak zaczyny, zaprawy cementowe i inne, przy odpowiedniej zawartości fazy stałej, charakteryzuje granica płynięcia (τ_0), po przekroczeniu której występuje liniowa zależność między naprężeniem τ i prędkością $\dot{\gamma}$ (2.3) – ciało Bingham, rys.2.10 :

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad \text{równanie Bingham} \quad (2.3)$$

gdzie:

τ_0 - binghamowska granica płynięcia [Pa],
 η_{pl} - lepkość plastyczna [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$].



Rys. 2.10 Krzywe płynięcia cieczy Newtona i ciała Bingham [52]

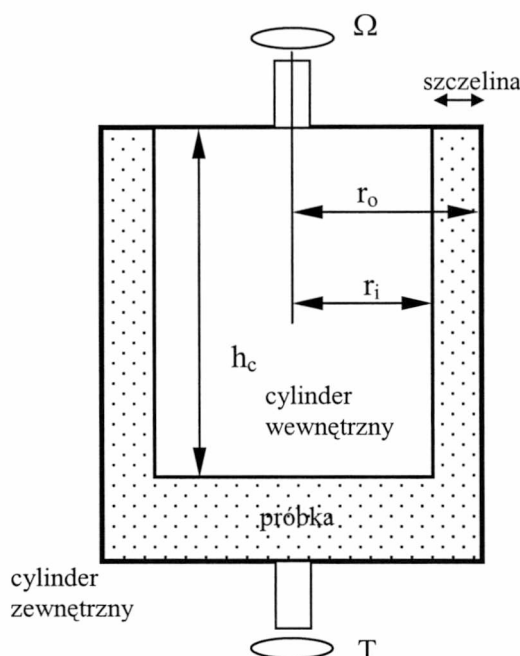
2.2.2 Metody badań

Określenie właściwości reologicznych zawiesin typu zaczyny cementowe, wymaga wyznaczenia obydwu parametrów tj.: granicy płynięcia i lepkości plastycznej, rys.2.10. Krzywe płynięcia najczęściej wyznacza się przy użyciu wiskozymetrów rotacyjnych o cylindrach współosiowych i regulowanej prędkości ścinania, mierząc moment przenoszony z obracającego się cylindra na cylinder nieruchomy, rys 2.11. Dla cieczy Newtona zależność między momentem T i prędkością kątową Ω jest liniowa (2.4) i odpowiada zależności naprężenia ścinającego τ od prędkości ścinania $\dot{\gamma}$ (2.1):

$$T = \eta \cdot 4 \cdot \left[\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right] \cdot \Pi \cdot h \cdot \Omega \quad (2.4)$$

gdzie:

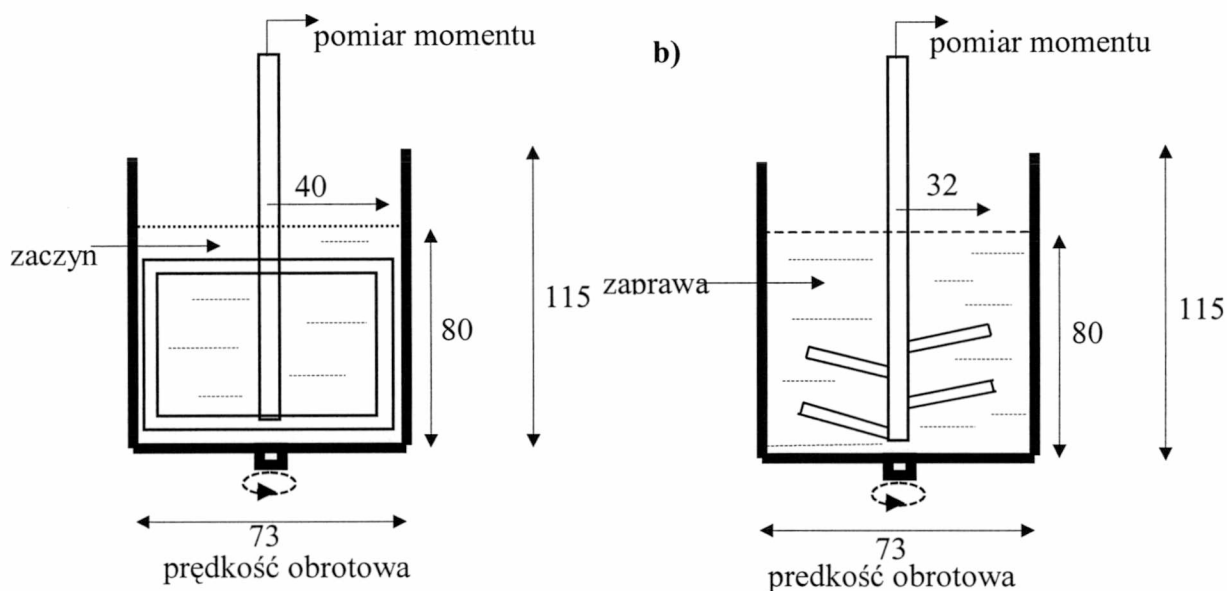
- η - lepkość [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$],
- r_i - promień wewnętrznego cylindra [mm]
- r_o - promień zewnętrznego cylindra [mm]
- h - wysokość wewnętrznego cylindra [mm]



Rys. 2.11 Schemat wiskozymetru rotacyjnego o cylindrach współosiowych

Do zapewnienia jednorodnego ścinania zawiesin, szerokość szczeliny jest odpowiednio mała. Ogranicza ona wielkość ziaren w zawiesinie. Ponadto przy stosowanych w/c, różnica gęstości cementu i wody powoduje w czasie pomiaru występowanie zjawiska sedymentacji, które utrudnia prawidłową interpretację wyników.

Innym rozwiązaniem urządzeń do badań właściwości reologicznych zawiesin ograniczającą sedimentację, jest zastąpienie wewnętrznego cylindra mieszadłem. Takim urządzeniem jest wiskozymetr typu "Viskomat PC", rys.2.12. Wyposażony jest on w dwa mieszadła o różnej geometrii do pomiaru parametrów reologicznych zaczynów i zapraw [52,53].



Rys. 2.12 Schemat pomiaru w wiskomacie "Viskomat PC": a) zaczyn, b) zaprawa

Pomiar polega na wyznaczeniu krzywych płynięcia, to jest zależności między sterowaną prędkością obrotową N [obr./min.] a momentem wywołanym oporem mieszanki T [Nmm], rys.2.13. Przyjęcie do opisu właściwości reologicznych modelu Bingham'a pozwala z uzyskanych krzywych płynięcia, wyznaczyć oba parametry reologiczne g i h , które opisuje zależność (2.5):

$$T = g + h \cdot N \quad (2.5)$$

gdzie:

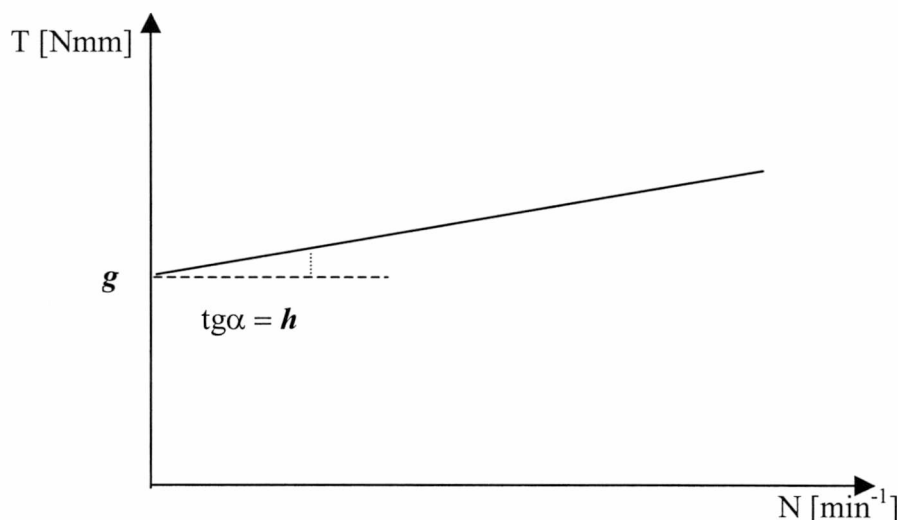
g - odpowiada binghamowskiej granicy płynięcia, τ_0 [Nmm],

h - odpowiada lepkości plastycznej, η_{pl} [Nmm · min].

Sterowanie przebiegiem badania, rejestracja i obróbka wyników, prowadzona przy pomocy komputera IBM PC i programu „Visko”, jest w pełni zautomatyzowana. Komputerowo przetwarzane wyniki umożliwiają otrzymanie następujących zależności:

- momentu od liczby obrotów,
- temperatury od czasu ścinania,
- momentu od czasu ścinania, przy stałej prędkości.

Analizę wyników opiera się na bezpośrednio wyznaczonych parametrach g i h . Z reguły nie przelicza się parametrów g i h na τ_0 i η_{pl} . Taka konieczność występuje, gdy porównanie danych uzyskanych z różnych urządzeń pomiarowych jest niezbędne. Przeliczenie wykonuje się przemnażając parametry g i h przez stałe wiskozymetru, wyznaczone przy użyciu cieczy o znanej lepkości (η).



Rys. 2.13 Krzywa płynięcia zawiesiny uzyskana z wiskomatu typu „Viskomat PC”

2.2.3. Wpływ składników na reologię mieszanek

Wpływ składników matrycy

Wpływ składników zapraw na parametry reologiczne g i h szczegółowo badał Banfill przy użyciu wiskozymetru typu Viskomat [52,53,54]. Uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 2.3.

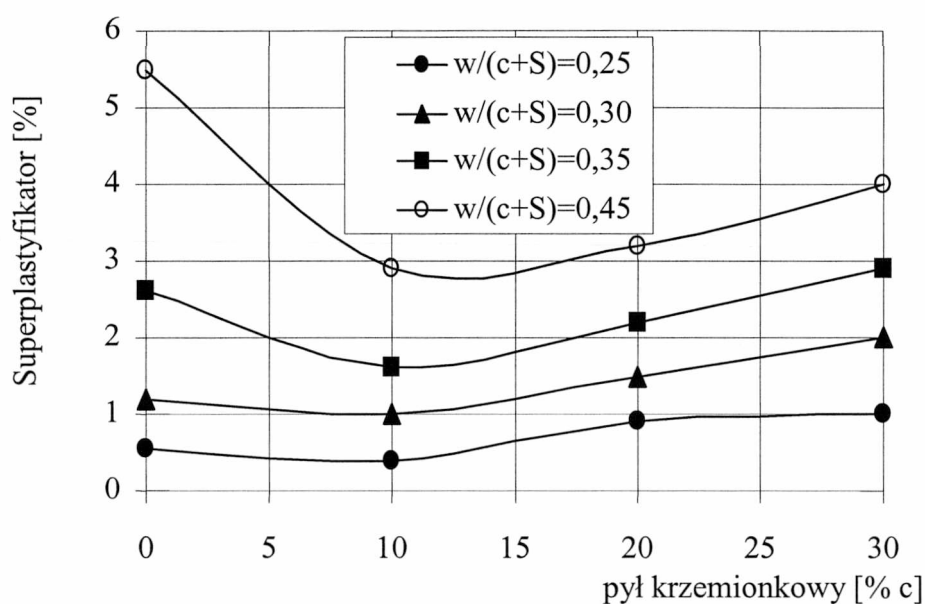
Tablica 2.3 Wpływ składu zapraw na kierunek zmian parametrów reologicznych [54]

Składnik	Granica płynięcia (g)	Lepkość plastyczna (h)
Wzrost zawartości wody	obniżenie	obniżenie
Wzrost zawartości piasku	wzrost	wzrost
Wzrost zawartości cementu	wzrost	wzrost
Zmniejszenie uziarnienia	wzrost	wzrost/ bez zmian
Dodanie superplastyfikatora	obniżenie	bez zmian
Napowietrzanie	bez zmian	obniżenie
Zastąpienie części cementu popiołem	obniżenie	obniżenie/zwiększenie [64]
Pył krzemionkowy	wzrost	obniżenie

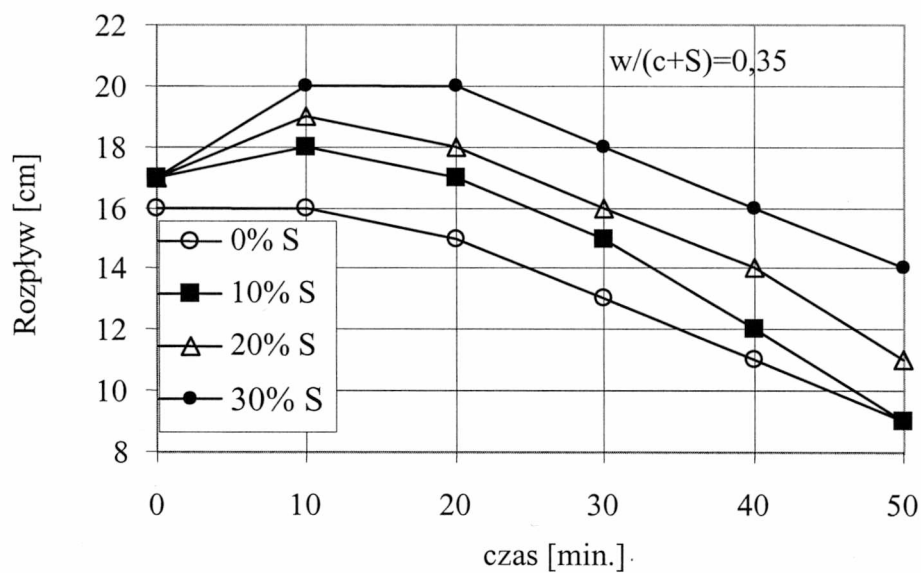
Mikrowypełniacze, takie jak pył krzemionkowy, zwiększają zagęszczenie mieszanek, zmniejszają międzyziarnowe tarcie (parametr h) mechanizmem „ball rolling”, ograniczają segregację składników i tworzenie się warstwy przejściowej [55].

Zalecane ilości zastąpienia cementu pyłem krzemionkowym, ze względu na strukturę porowatości i wytrzymałość, nie przekraczają 10% masy cementu [56,57], według Katz 7,5% [42], a ze względu na superplastyfikator Sp, optymalna zawartość pyłu niezależnie od w/c jest podobna i wynosi około 10%, rys.2.14. Można zauważyć, że przy podanej zawartości pyłu wymagana ilość Sp do zapewnienia stałego rozplywu, zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem w/c, rys.2.15.

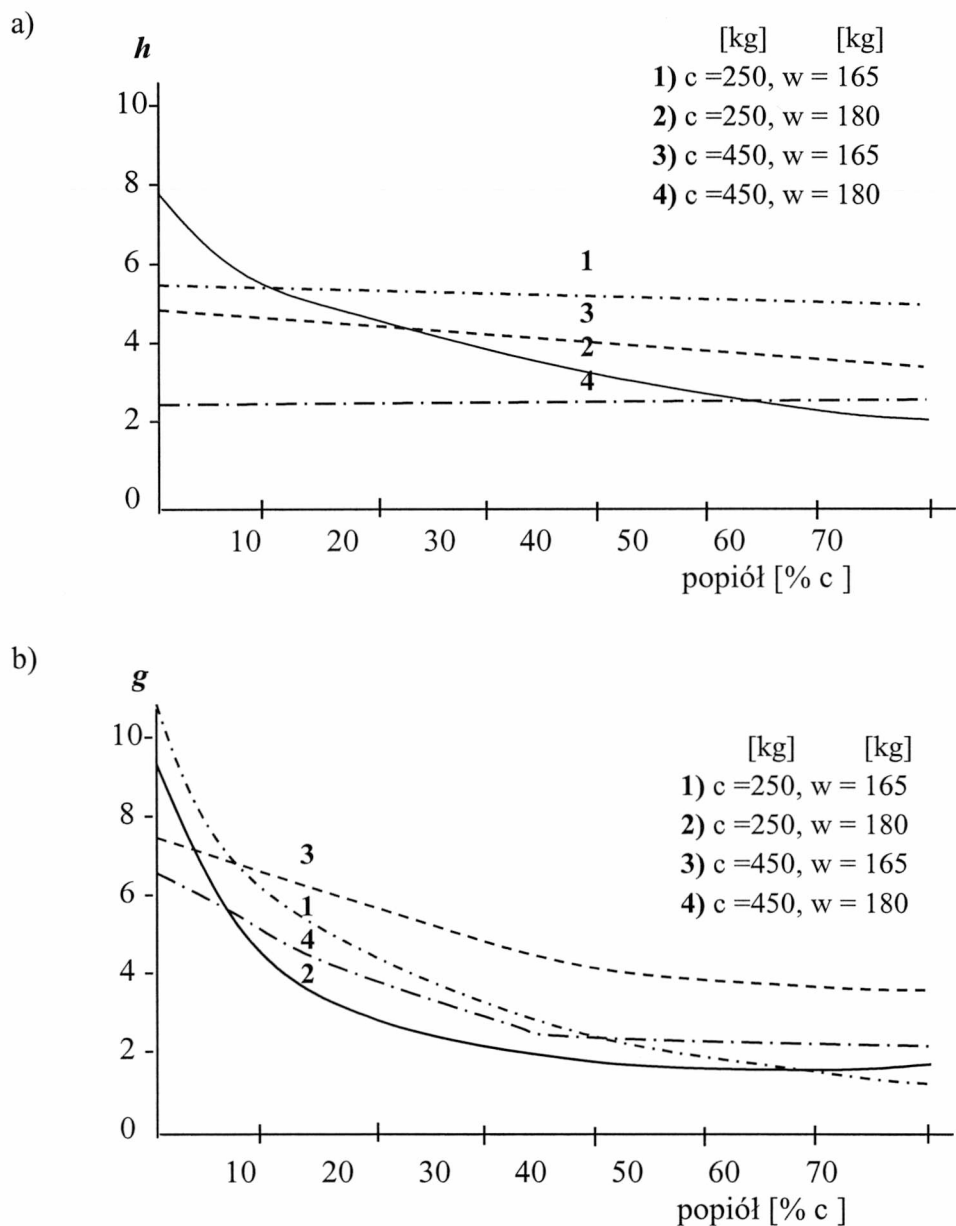
W dotychczasowych badaniach wykazano korzystny wpływ niskowapniowych popiołów lotnych F na parametry reologiczne mieszanek, rys.2.16 [34,58,59].



Rys.2.14 Wpływ pyłu krzemionkowego na zużycie Sp (Duval, Kadri [57])



Rys.2.15 Wpływ czasu mieszania na rozpływ mieszanki cementowej przy różnej zawartości pyłu krzemionkowego (Duval, Kadri [57])



Rys.2.16 Wpływ podstawienia cementu popiołem lotnym na:

a) międzyziarnowe tarcie -parametr h ,

b) granicę płynięcia - parametr g ,

według Banfill, Tattersall [60]

Wpływ włókien na urabialność

Włókna w świeżych zaczynach, zaprawach lub betonach, zachowują się podobnie do wydłużonych ziaren kruszywa o względnie dużej powierzchni właściwej. Stąd, podobnie do ziaren o dużej asymetrii, pogarszają właściwości reologiczne zawiesin, rys.2.17-2.20 [61].

Niezbędnym warunkiem do otrzymania kompozytów HPFRC z matrycą typu wysokowartościowych zapraw, przy względnie małym w/c , jest jednorodne rozproszenie odpowiedniej ilości włókien. Możliwa do rozproszenia ilość uzbrojenia zależy od wielu czynników, w tym od urabialności mieszanki, parametru L/d włókien, ich zawartości i zwilżalności. Dążenie do zwiększenia urabialności mieszanek, wprowadzeniem różnego rodzaju dodatków i domieszek chemicznych, przy niekorzystnym wpływie włókien na reologię, wymaga stosowania takich metod, które pozwalają kontrolować zmiany w układzie. Tradycyjne metody pomiarów parametrów reologicznych mieszanek (opad stożka, Ve-Be, rozplływ), są niewystarczające szczególnie w odniesieniu do upłynnionych zaczynów i zapraw.

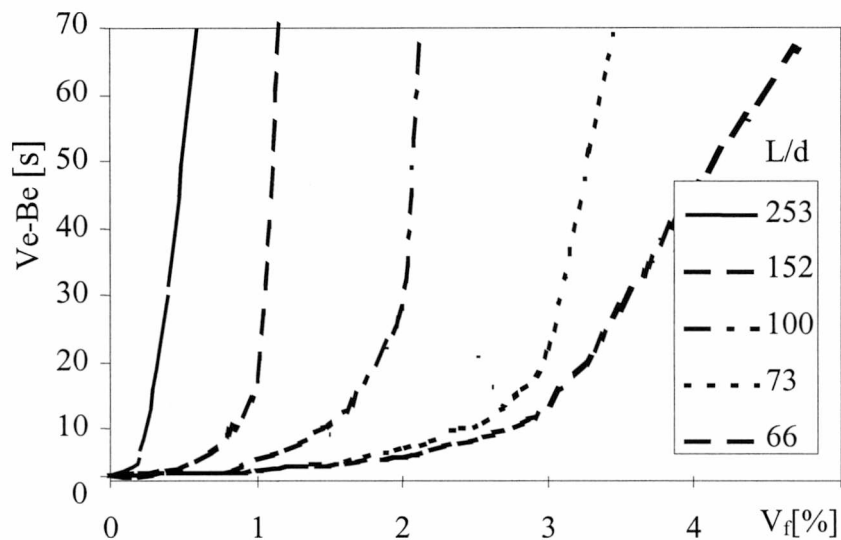
Niekorzystny wpływ włókien na urabialność zmniejsza się stosowaniem różnego rodzaju dodatków chemicznych, zwykle upłynniaczy i domieszek mineralnych jako mikrowypełnień [62,63,64]. Szczególnie korzystny wpływ pyłu krzemionkowego na urabialność i rozproszenie włókien węglowych „pitch” wynika z prac Ohama [10], Park [65], Katz i Bentur [42,56] i wielu innych.

O ilości możliwych do rozproszenia włókien decyduje zarówno matryca, jak i parametry włókien, a zwłaszcza ich zawartość i stosunek długości do średnicy (parametr L/d). Od niego zależy liczba włókien w jednostce objętości i odległości między nimi (tab.2.1). Stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem zawartości V_f i L/d wzrasta tendencja do skłębiania się włókien podczas mieszania, uniemożliwiająca prawidłowe ich rozproszenie, rys.2.17. Dostępne objętości dla włókien określa udział objętościowy zaczynu cementowego w mieszanke, od którego zależy ilość wprowadzanego uzbrojenia, rys.2.18.

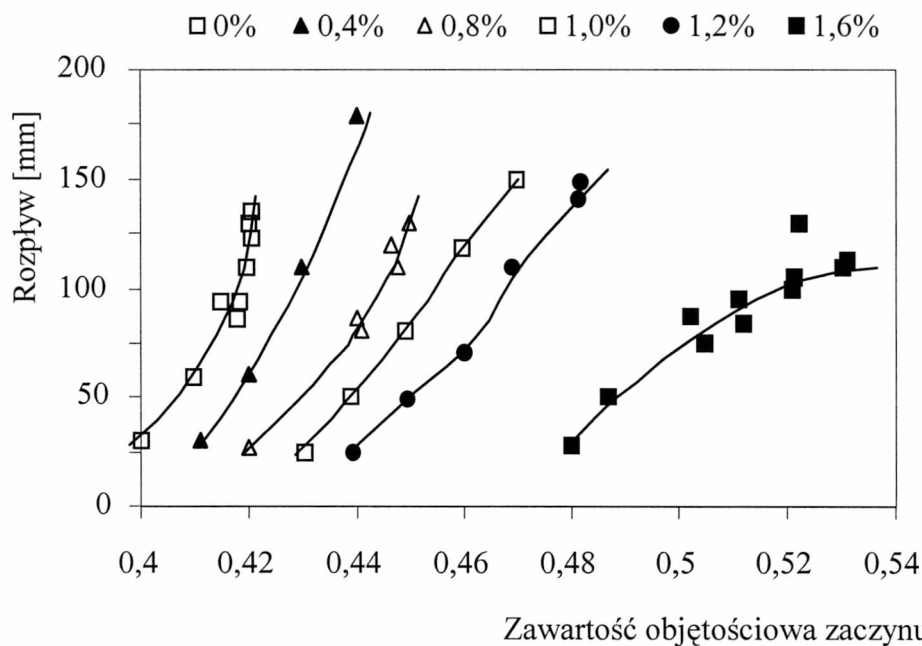
Wpływ parametru L/d i składu mieszanki na urabialność był przedmiotem badań Ohama i inni [13]. Do uzbrojenia matrycy ($w/c=0,3$, $S/c=0,4$, 6% Sp) zastosowano handlowe włókna węglowe o długości 3 i 10 mm i średnicy 14,5 μm w ilości V_f od 0 do 5%. Stwierdzono, że urabialność mieszanek niezależnie od długości włókien pogarsza się z ich ilością (co potwierdził Banthia i inni [35,61]). Przy tej samej zawartości V_f i różnej długości (3mm i 10mm), krótkie włókna (3mm), których jest znacznie więcej w jednostce objętości, silniej zmniejszają rozplływ, rys.2.19.

Jak wynika z rys.2.20 niezależnie od rodzaju i długości włókien występuje liniowa zależność między powierzchnią włókien a rozplywem. Wykazano, że niezależnie od rodzaju włókien rozplyw jest proporcjonalny do ich średnicy i odwrotnie proporcjonalny do objętości (Ando i inni [38]). Otrzymane wyniki wskazują, że przy dodaniu 5% V_f , dużemu spadkowi rozplywu odpowiada zanik wpływu rodzaju i długości włókien na urabialność, rys.2.19 [61].

Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że włókna krótsze od maksymalnej wielkości ziaren kruszywa mają małą efektywność uzbrojenia, dlatego włókna stosowane w mieszankach betonowych są dłuższe: 25-60 mm, od włókien w matrycach cementowych 3-18 mm [7].

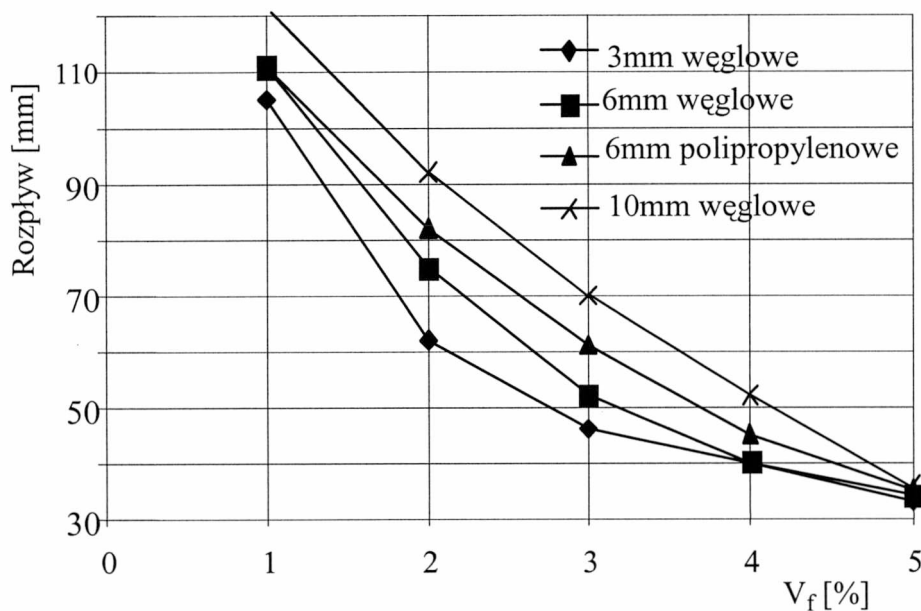


Rys.2.17 Wpływ zawartości włókien stalowych i L/d na urabialność Ve-Be [61]

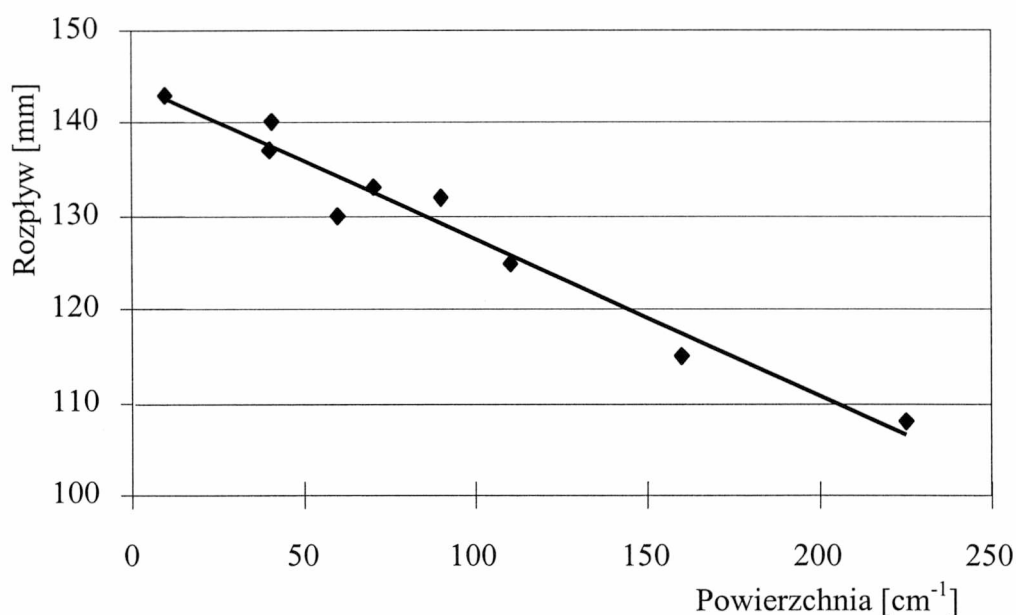


Rys.2.18 Wpływ objętości zaczynu na rozplyw mieszanek cementowych z włóknami stalowymi [61]

Tekstura powierzchni włókien może ułatwić wzajemny ich poślizg i poprawić urabialność. Potwierdzają to wyniki badań, w których porównano włókna węglowe z polipropylenowymi o znacznie gładziej powierzchni. Otrzymano podobną urabialność przy znacznie większym stosunku L/d i powierzchni właściwej włókien polipropylenowych, rys.2.19 [61].



Rys.2.19 Wpływ długości i rodzaju włókien na zależność między rozplywem a zawartością włókien V_f [61]

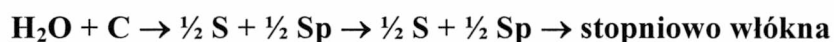


Rys.2.20 Wpływ powierzchni właściwej włókien węglowych na urabialność mieszanek cementowych [61]

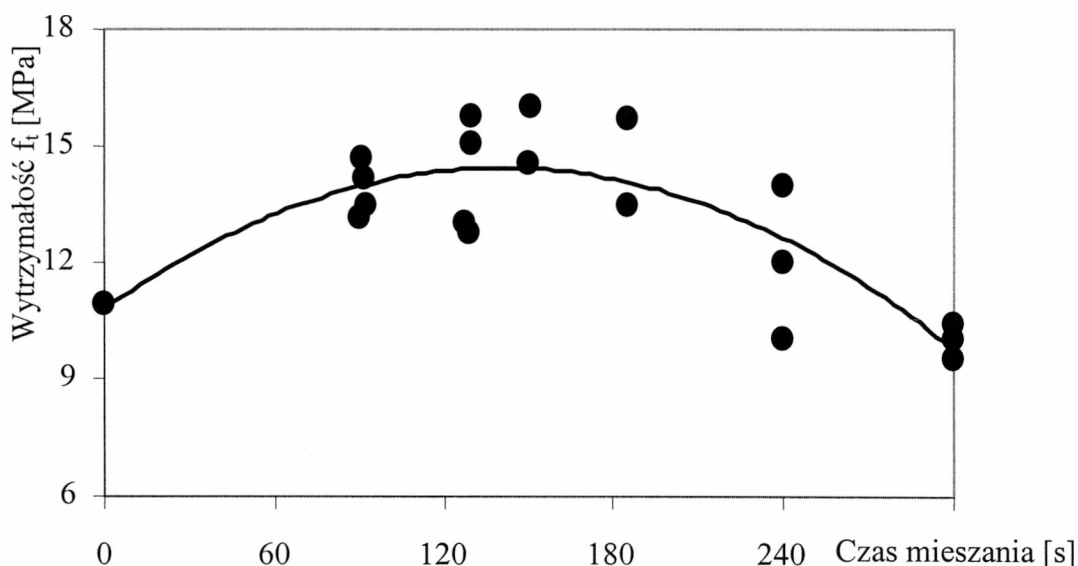
Wpływ sposobu rozproszenia na urabialność mieszanki

Trudności z rozproszeniem kruchych i hydrofobowych włókien węglowych, w mieszankach opartych na spoiwie cementowym, zmniejszają efektywność ich stosowania. Wiele uwagi poświęca się zwiększeniu powinowactwa włókien węglowych do wody oraz różnym technikom ich rozpraszania (rozdział 2.2.4).

W celu ograniczenia wpływu sposobu przygotowywania zaczynów i zapraw z włóknami na właściwości reologiczne, wielu autorów postępuje zgodnie z wytycznymi zawartymi w ASTM 230, które zalecają następującą kolejność dodawania składników: woda + cement (c) + połowa pyłu krzemionkowego ($\frac{1}{2}S$) + połowa superplastyfikatora ($\frac{1}{2}Sp$) + druga połowa pyłu krzemionkowego ($\frac{1}{2}S$) + druga połowa superplastyfikatora ($\frac{1}{2}Sp$) + stopniowo włókna.



Duży wpływ na efekt uzbrojenia ma czas mieszania składników z włóknami, rys.2.21. Zbyt krótki powoduje niejednorodne rozproszenie włókien, długi zwiększa prawdopodobieństwo ich niszczenia i prowadzi do spadku urabialności samej matrycy, rys.2.15. Według Sakai optymalny czas mieszania nie powodujący obniżenia wytrzymałości kompozytu wynosi od 120 do 180 sekund [66] i nie powinien przekraczać 10 minut (Duval, Kadri [98]).



Rys.2.21 Wpływ czasu mieszania na f_t kompozytu z dodatkiem włókien węglowych [66]

2.2.4 Rozpraszanie włókien w mieszankach

Stosując superplastyfikator i pył krzemionkowy uzyskuje się znaczną poprawę rozproszenia włókien przy użyciu zwykłego mieszadła do zapraw, Ohama [47]. Efekt użycia takiego mieszadła do zaczynów i zapraw może powodować zmianę parametru L/d łamaniem kruchych włókien. Problem ten minimalizuje się stosując inny typ mieszadła tzw. Omni-mixer, który nie powoduje ścinania mieszanki podczas mieszania. Umożliwia też zwiększenie intensywności mieszania, wprowadzenie i prawidłowe rozproszenie większej ilości włókien, przy jednoczesnym zmniejszeniu prawdopodobieństwa ich łamania (Ohama [10], Nishioka [28], Linton i inni [67]). Przykłady składów mieszanek do otrzymywania kompozytów przy użyciu mieszadła zwykłego i Omni-mixer, przedstawia tab.2.4.

Tablica 2.4 Przykłady składu mieszanek z włóknami

Rodzaj mieszadła Skład	Omni-mixer [48]	Zwykłe mieszadło [40]
Włókna (pitch) $V_f\%$	2-4,5	0-5
Długość [mm]	10	10
Średnica [μm]	14,5	14-18
L/d	690	555-715
Piasek/Cement	0-0,5	-
Pył krzemionkowy/cement	-	0,2
w/c	0,3-0,53	0,4
Metyloceluloza [% c]	1,0	-
Sp-[%]	+	+
Środek przeciwpieniący [%]	+	-

Możliwość lepszego rozproszenia uzyskano w wyniku modyfikacji powierzchni włókna ozonem, obróbką NaOH, H_2O_2 , jak również dodatkiem polimerowych domieszek (latexu, metylocelulozy) [68].

W pracach [22,48,69] potwierdzono korzystny wpływ na rozpraszanie włókien metylocelulozy z odpieniaczem. W obecności tych dodatków wytrzymałość f_t wzrosła prawie dwukrotnie [28].

W procesach mieszania, włókna poddawane są w różnym stopniu zginaniu, ścieraniu i łamaniu redukując parametr L/d i efekt uzbrojenia. Stwierdzono możliwość rozwłókniania, zwiększania powierzchni i pogarszania urabialności intensywnym mieszaniem. Występuje to najczęściej przy użyciu konwencjonalnej mieszarki, zwłaszcza jeżeli matryca zawiera w swoim składzie kruszywo. Celem zminimalizowania czasu narażenia włókien węglowych na niszczenie, stosowane są różne wstępne procesy mieszania składników przed dodaniem włókien. Tablica 2.5 przedstawia przykłady wpływu procedury na całkowity czas mieszania.

Tablica 2.5 Przykłady procedur przygotowywania mieszanek z włóknami przy użyciu konwencjonalnego mieszadła [61,34]

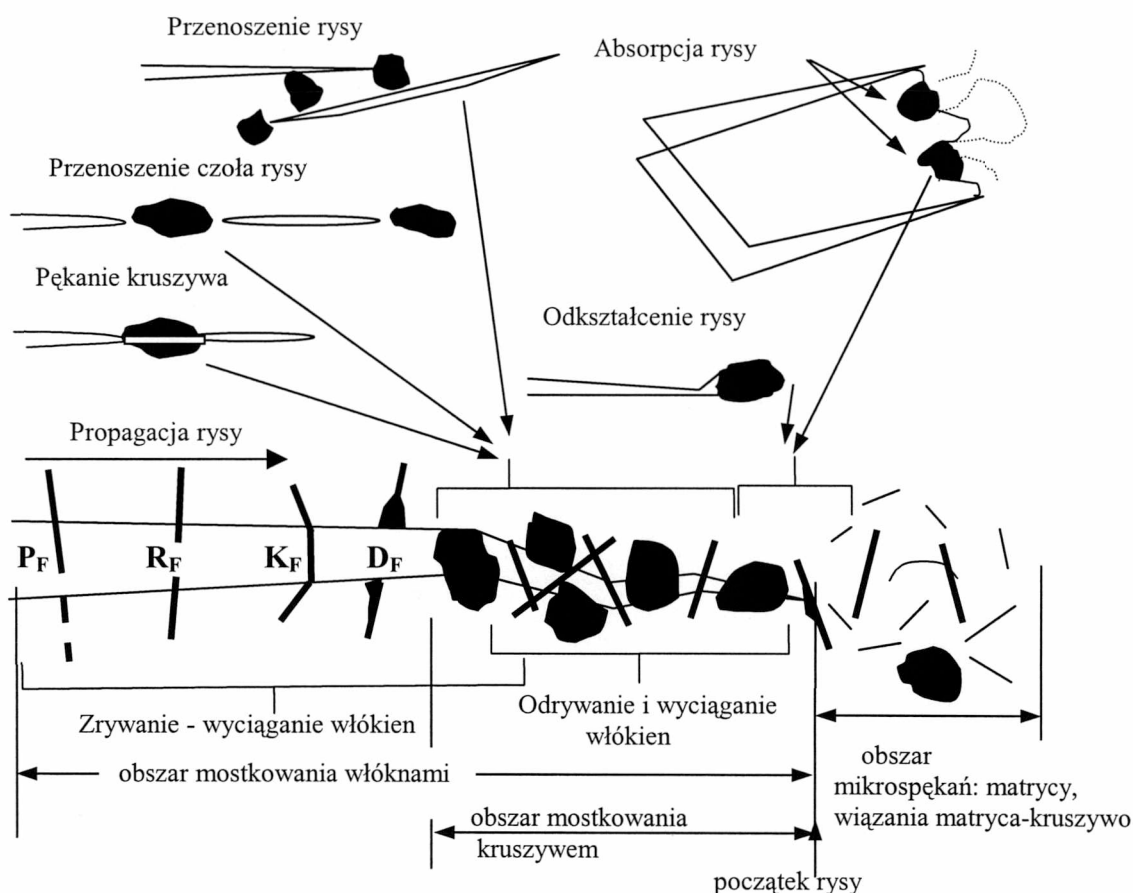
	Metoda A	Metoda B
Mieszanie na sucho	$\frac{1}{2}$ piasku, V_f , dyspergator omni-mixer 1 min	piasek, V_f , dyspergator mieszadło do zapraw 1 min
I Mieszanie na mokro	$\frac{1}{2}$ piasku, woda, Sp 3 minuty mieszania	Woda, Sp 3 minuty mieszania
II Mieszanie na mokro	domieszka przeciwpieniąca 4 minuty mieszania	domieszka przeciwpieniąca 1 minuta mieszania
Łączny czas mieszania	8 minut	5 minut

Zmiana procedury z A na B mimo użycia konwencjonalnego mieszadła, oprócz skrócenia czasu mieszania, pozwala zachować dobrą urabialność mieszanki (ułatwiając formowanie złożonych elementów), zmniejszyć o 75% zużycie karboksymetylocelulozy i znacznie zwiększyć wytrzymałość na zginanie kompozytu [34,61]. Potwierdza to istotny udział sposobu przygotowania mieszanki na efekt uzbrojenia.

2.3 Właściwości mechaniczne kompozytów

2.3.1 Mechanizm kontrolowania propagacji rys

Zwiększenie odporności na pękanie kompozytów typu FRC związane jest ze stabilną propagacją zainicjowanego pęknięcia, dzięki mostkowaniu rysy kruszywem i włóknami, rys.2.22. Przy odpowiednio dużej wytrzymałości kruszywa i włókna, istnieje możliwość przeniesienia czoła lub całej rysy. Pochłanianie energii następuje również w wyniku: zrywania, odspajania, klinowania lub wyciągania włókna z matrycy [70,71,72,73]. Włókno może być przeszkodą dla propagacji rysy, jeśli przenosi większe naprężenia niż matryca. Stwierdzone pękanie matrycy przed osiągnięciem wytrzymałości na rozciąganie uzbrojenia, powodowane jest jej mniejszą odkształcalnością. Efekt oddziaływania włókien nie jest wówczas ograniczony do kontroli propagacji rysy, istnieje możliwość zwiększenia rozpraszania energii na pojawienie się nowych spękań, bez propagacji pierwszej rysy. Warunkiem niezbędnym do zaistnienia takiego zjawiska, jest taka ilość włókien, aby odległość między nimi była mniejsza od krytycznej L_{kr} .



Rys.2.22 Mechanizmy niszczenia FRC: P_F -wyciąganie, R_F -zrywanie, D_F -odrywanie oraz K_F -klinowanie włókna [70,73]

2.3.2 Krytyczna długość włókien

Z dotychczasowych badań wynika [7], że jeżeli długość włókna jest mniejsza od krytycznej L_{kr} , to włókna nie pękają, ale i nie przenoszą maksymalnego obciążenia, rys.2.23. Włókna dłuższe od L_{kr} nie przenoszą większych obciążeń, stąd wykorzystanie mikrouzbrojenia odpowiada długości L_{kr} . Wraz z długością włókien wzrasta naprężenie, które może być powodem ich zrywania (Katz [74,75], Katz i Bentur [56,76,77]).

Krytyczną długość włókna otrzymuje się z porównania siły wywołanej przyczepnością matrycy do włókna z siłą wynikającą z jego wytrzymałości na rozciąganie (2.6), rys.2.23 [7,56].

$$\frac{1}{2} L_{kr} \pi d \tau = \frac{1}{4} \pi d^2 f_{tf} \quad (2.6)$$

$$L_{kr} = \frac{1}{2} d \frac{f_{tf}}{\tau} \quad (2.7)$$

gdzie:

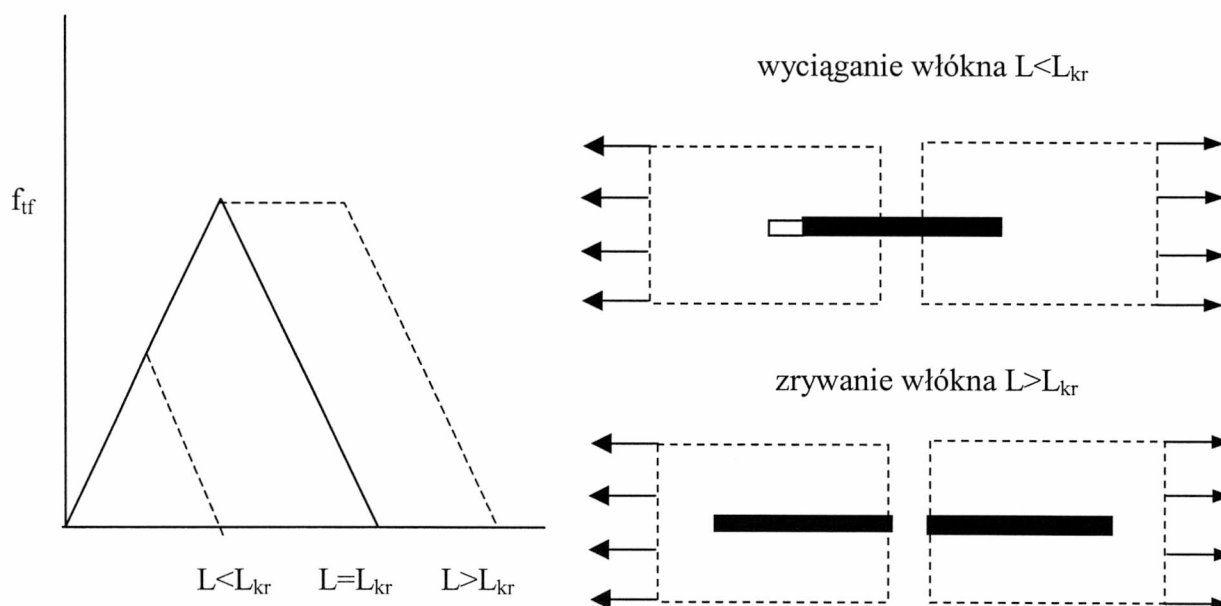
L_{kr} - krytyczna długość włókna

d - średnica włókna,

τ - graniczna wartość wytrzymałości wiązania matryca-włókno,

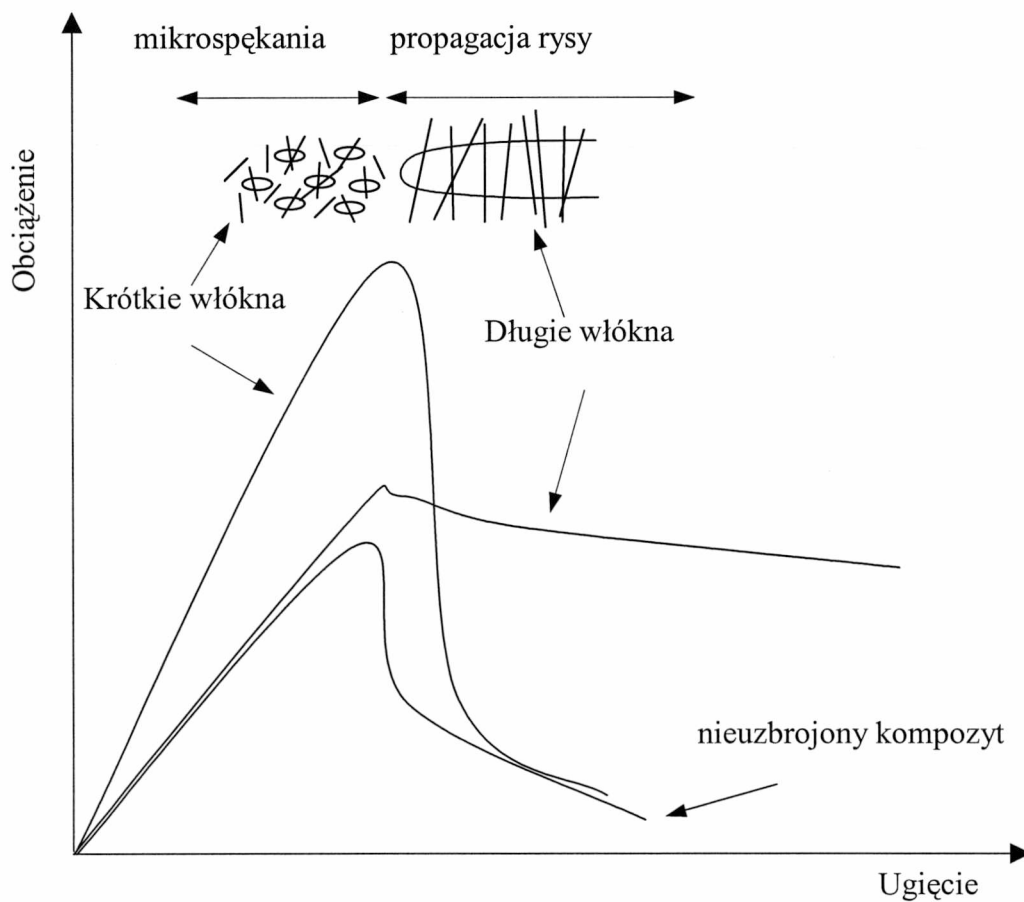
f_{tf} - wytrzymałość na rozciąganie włókna

naprężenie we włóknie



Rys.2.23 Zachowanie się włókna w kompozycie podczas rozciągania, w zależności od jego długości (Timoshenko [78])

Jak wynika z rysunku 2.24 proces zwielokrotnionego zarysowania kontrolowany jest krótkimi włóknami, natomiast propagacja rysy, dłuższymi (Betterman i inni [32]).



Rys.2.24 Mostkowanie rys włóknami i mikrowłóknami (Betterman, Ouyang, Shah, [32])

2.3.3 Zwielokrotnione zarysowanie - niezbędna zawartość włókien

W wysokowartościowych kompozytach HPFRC między liniowo-sprężystym zakresem i obciążeniem maksymalnym pojawia się zakres odkształceń niesprężystych, w którym rozpraszanie energii jest wynikiem zwielokrotnionego zarysowania, rys.2.1. Zjawisko takie występuje wtedy, gdy energia potrzebna na inicjację nowej rysy jest mniejsza od energii potrzebnej na propagację już istniejącej. Takiemu zachowaniu odpowiada pojawienie się na krzywej: obciążenie-ugięcie II zakresu, w którym kompozyt zachowuje się jak materiał pseudoplastyczny, zużywający energię na tworzenie nowych rys. Odpowiada temu zdolność do przenoszenia zwiększonych obciążeń po zarysowaniu, rys.2.1 [11,13,16].

Warunkiem zwiększenia odporności na pękanie mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania jest zapewnienie minimalnie niezbędnej zawartości włókien do tego, żeby odległość między włóknami w kompozycie była mniejsza od krytycznej wielkości rysy w sensie Griffitha (rys.2.24 - mostkowanie mikrospękań).

Niekorzystny wpływ włókien na parametry reologiczne mieszanek i ich cena, uzasadnia poszukiwanie sposobu do wyznaczenia ich ilości niezbędnej do uzyskania zamierzonego efektu. Zadanie nie jest łatwe, ponieważ niezbędna zawartość włókien do zwiększenia odporności na pękanie mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania nie jest stała, tylko zależy od parametrów włókna i matrycy, którą dodatkowo charakteryzują zmiany w czasie.

Istnieją różne teoretyczne sposoby wyznaczania minimalnej ilości włókien [13,33,41]: Pierwszy model zaproponowany przez Naamana 1984 (rys.2.25) jest oparty na założeniu, że do wystąpienia zwielokrotnionego zarysowania maksymalne naprężenie po zarysowaniu powinno być większe od naprężenia wywołującego pierwsze zarysowanie (f_t kompozytu $>$ δ_{kr}). Z równowagi sił na wyciąganie i zrywanie włókien, przy zastosowaniu odpowiednich współczynników wynika, że:

$$V_{fkr} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\sigma_{mu}} \cdot \frac{L}{d} (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - \alpha_1 \alpha_2)} \quad (2.8)$$

gdzie:

V_{fkr} – krytyczna zawartość włókien,

L – długość włókna,

d – średnica włókna,

σ_{mu} – wytrzymałość na rozciąganie matrycy,

τ – średnia wytrzymałość wiązania matryca-włókno,

α_1 – współczynnik wiązania matryca-włókno przy pierwszym zarysowaniu,

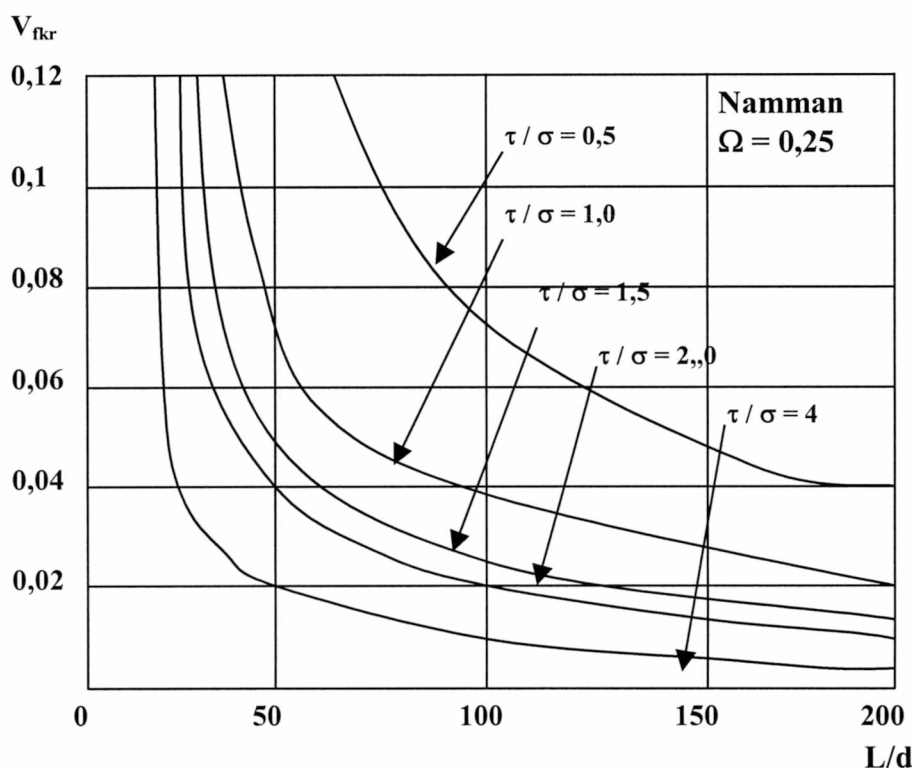
α_2 – współczynnik orientacji włókien w niezarysowanym kompozycie,

λ_1 – oczekiwany współczynnik wyciągania włókna (wynoszący $\frac{1}{4}$ z przyjmowanych założeń),

λ_2 – współczynnik efektywności orientacji włókien w zarysowanym kompozycie,

λ_3 – współczynnik związany z liczbą wyciąganych włókien przypadających na jednostkę powierzchni.

$$\Omega = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - \alpha_1 \alpha_2$$



Rys.2.25 Zależność krytycznej zawartości włókien stalowych od parametru L/d przy różnych wartościach stosunku przyczepności włókien τ , do wytrzymałości na rozciąganie matrycy σ_{mu} (Naaman, Reinhardt [13])

W drugim modelu wykorzystano pojęcie mechaniki pękania. Podstawowym warunkiem jest, aby wytrzymałość po zarysowaniu kompozytu wynikająca z mechaniki mostkowania rys włóknami i ich wyciągania była większa, od wynikającej z mechaniki pękania wytrzymałości f_t samej matrycy (Li, Stang i Krenchel 1993). Na jego podstawie Naaman i Reinhardt w 1995 zaprezentowali własny model dla włókien stalowych:

$$V_f \geq V_{fkr} = \frac{12 J_{tip}}{g \cdot \tau \cdot \frac{L}{d} \delta_o} \quad (2.9)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2 (1 - V_f)(1 - v_m^2)}{E_m} \quad (2.10)$$

$$\delta = \frac{\tau \cdot L^2}{E_f d(1 - \eta)} \quad (2.11)$$

gdzie:

J_{tip} - energia powierzchniowa matrycy [J/m^2],

g – współczynnik efektywności orientacji włókien (przy założeniu $\lambda_2=1,2$),

η - $E_f V_f / E_m V_m$,

E_f - moduł Younga włókna [GPa],

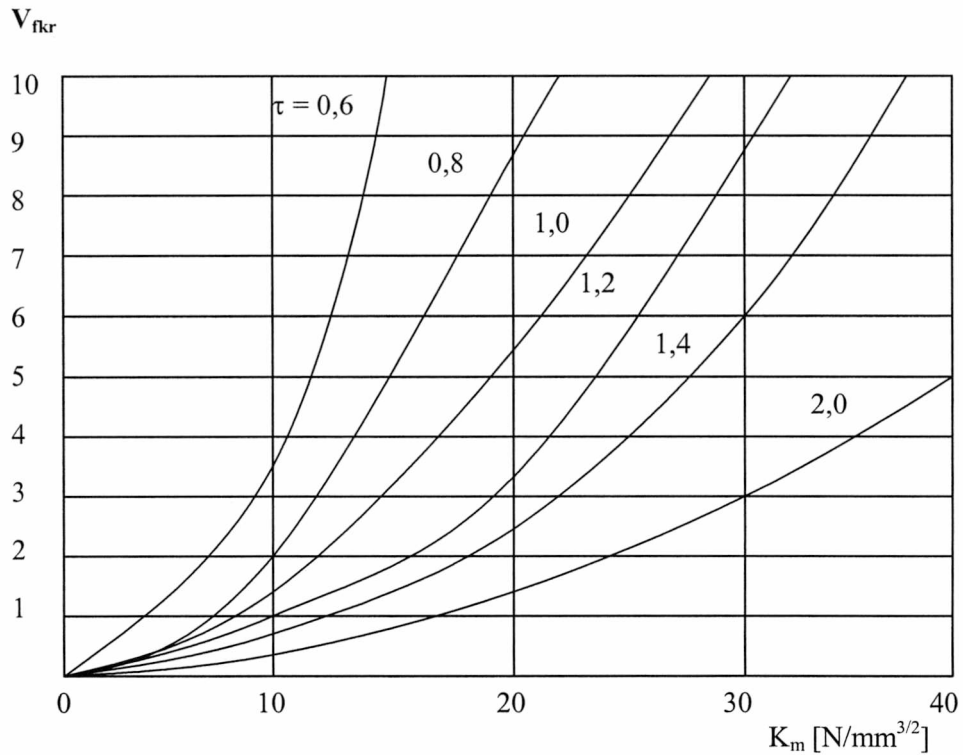
E_m - moduł Younga matrycy [GPa],

K_m – odporność na pękanie matrycy [$N/mm^{3/2}$],

v_m – współczynnik Poissona, matrycy=0,2,

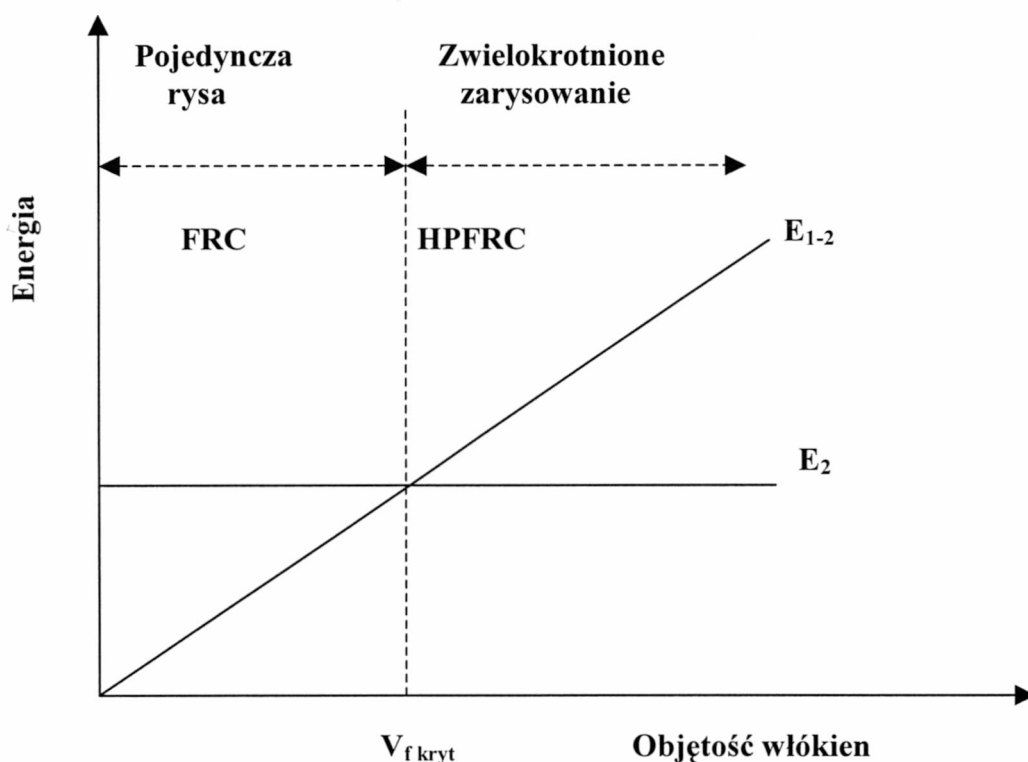
τ - przyjęta wytrzymałość wiązania matryca-włókno (przyczepność).

Zastosowanie powyższego modelu dla niskomodulowych włókien węglowych przedstawili Kucharska, Brandt [33], rys.2.26. Wyznaczone wartości V_{fkr} wahają się między 1,0 - 1,5% i K_m 10 $N/mm^{3/2}$ i dobrze odpowiadają результатам badań [33].



Rys.2.26 Krytyczna objętość niskomodulowych włókien węglowych V_{fkr} , jako funkcja K_m , przy różnych wartościach τ [33]

Tjiptobroto i Hansen [79], bazując na rozważaniach dotyczących energii E_1 potrzebnej do propagacji pierwszego zarysowania oraz energii E_2 niezbędnej do otwierania się rys, zaproponowali inny sposób wyznaczenia minimalnej ilości włókien niezbędnej do wzmocnienia kompozytu mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania, rys.2.27. Metoda energetyczna opiera się na porównaniu energii niezbędnej do inicjacji rysy z energią do jej propagacji.



Rys.2.27 Wyznaczenie krytycznej zawartości włókien w oparciu o kryterium energetyczne [79]

Ilość powstałych mikrospeków określić można stosunkiem energii potrzebnej do otwierania się rys E_{1-2} , do energii potrzebnej do utworzenia nowej rysy ($E_2=E_3=.....=E_n$):

$$\text{Liczba mikrorys} = E_{1-2} / E_2 \quad (2.11)$$

Jak wynika z rys.2.27 przy małej zawartości włókien energia potrzebna na powiększenie rysy (E_{1-2}), jest mniejsza od energii tworzącej nową rysę (E_2). Oznacza to, że propagować będzie tylko pojedyncza rysa, tak jak to ma miejsce w FRC. Znaczne zwiększenie odkształcalności kompozytu mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania wymaga zwiększenia zawartości włókien powyżej V_{kr} [79]:

$$V_f > V_{fkr} = 2 \frac{\gamma_m + \sqrt{\gamma_m^2 + C}}{C} \quad (2.12)$$

gdzie: $C = 2\gamma_m + \frac{2L}{d} \left[\frac{11}{24} \tau^2 \frac{l^2}{E_f d} + G_d \right]$

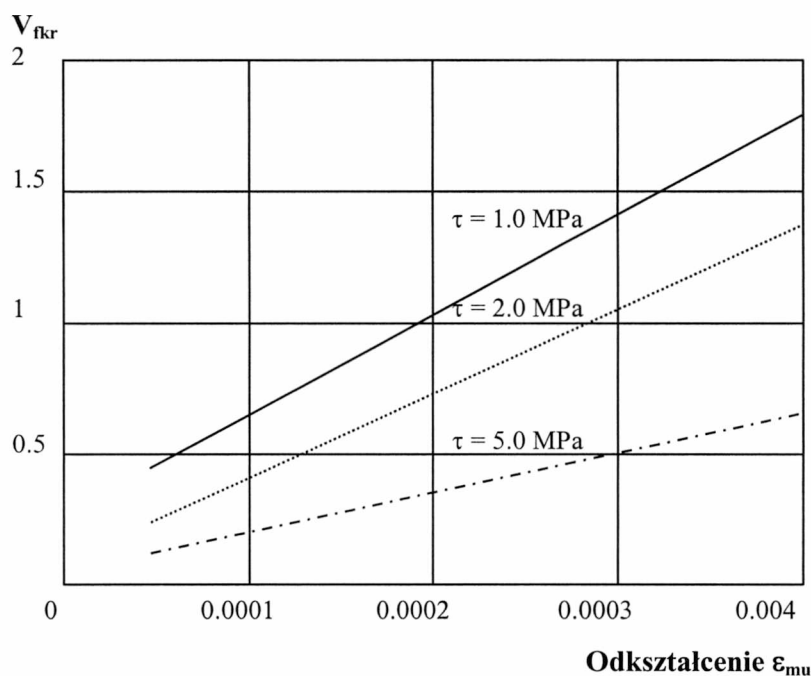
γ_m – energia powierzchniowa matrycy ($\gamma_m = 1/2 J_{tip}$, z równ. 2.10, [J/m²]),

τ -przyjęta wytrzymałość wiązania matryca-włókno (przyczepność),

E_f - moduł Younga włókna [GPa],

G_d - energia potrzebna na oderwanie włókna od matrycy.

Wykorzystanie metody energetycznej dla niskomodulowych włókien węglowych przedstawili Kucharska i Brandt [80]. Rezultaty obliczeń V_{fkr} , pokazano na rys.2.28, gdzie V_{fkr} jest funkcją maksymalnego odkształcenia ϵ_m dla różnych wartości wytrzymałości wiązania matryca-włókno (τ).



Rys.2.28 Krytyczna zawartość włókien V_{fkr} jako funkcja ϵ_m przy różnych wartościach τ [80]

Wyznaczone ilości włókien wahają się, podobnie jak w drugim modelu (2.9), między $V_{fkr} = 0,5-1,5\%$ (Li, Stang, Krenchel). Otrzymywane wyniki dobrze korespondują z wynikami doświadczalnymi. Wydaje się, że drugi i trzeci model lepiej obrazuje zachowanie się kompozytów cementowych z niskomodulowymi włóknami węglowymi, jednak wymagają dalszego rozwoju w szczególności w odniesieniu do matryc wysokowytrzymałych, w celu wyznaczenia stałych (τ , σ_{mu} , ϵ_m , Ω) potrzebnych do prawidłowego opisu modeli.

Przedstawione modele oparte są na założeniu, że włókna są wyciągane z matrycy. Przyjmując, że włókna są zrywane Naaman i Reinhardt podali następującą zależność do obliczenia V_{fkr} [65]:

$$V_f \geq V_{fkr} = \frac{\sigma_m}{\sigma_f + \sigma_m - \varepsilon_m E_f} \quad (2.13)$$

$$V_f \geq V_{fkr} \approx \frac{\sigma_m}{\sigma_f} \quad (2.14)$$

gdzie: σ_m – wytrzymałość na rozciąganie matrycy,
 σ_f – wytrzymałość na rozciąganie włókna,
 E_f - moduł Younga włókna,
 ε_m - odkształcenia matrycy.

Z powyższego równania wynika, że dla typowej matrycy cementowej o wytrzymałości na rozciąganie 3,5 MPa, minimalna zawartość włókien, o $f_t=1400$ MPa, wynosi $V_{f (min)}=0,25\%$. Użycie włókien o czterokrotnie mniejszej wytrzymałości (350 MPa) do uzyskania podobnego efektu, wymaga czterokrotnego zwiększenia zawartości włókien $V_{f (min)}=1\%$. Wykazano, że można zmniejszyć wymaganą zawartość włókien, zwiększając wiązanie matryca-włókno lub parametr L/d (tab.2.6). Przedstawione równania odniesiono do uzbrojenia ułożonego wzdłuż działających naprężeń, w przypadku włókien rozproszonych ich zawartość będzie większa niż wynika z równań.

Tablica 2.6 Krytyczna zawartość włókien stalowych, wyznaczona teoretycznie [13]

L/d	$V_{fkr} [\%]$			
	Naaman (2.8)		Li , Wu, Stang, Krenchel (2.9)	Tjiptobroto, Hansen (2.12)
	$\tau / \sigma_{mu} = 1$	$\tau / \sigma_{mu} = 2$	$\tau=5$ MPa, $G_d=20$ J/m ² , $J_{tip}=2$ J/m ² , $g=\lambda_2=1,2$; $E_f=200$ GPa, $E_m=20$ GPa, $\gamma_m=20$ J/m ² , $\gamma_m=10$ J/m ²	
0	100%	100%	-11,1%	209%
1	80	67	-	71,8
10	28,6	16,7	-	10,3
20	16,7	9,1	-	5,28
50	7,41	3,85	2,73	2,14
100	3,85	1,96	0,53	1,07
200	1,96	1	0,13	0,54

2.3.4 Metody oceny kruchości i odporności na pękanie

Istnieją różne kryteria oceny kruchości materiału. W odniesieniu do kompozytów cementowych za podstawową miarę przyjęto stosunek wytrzymałości f_t/f_c . Wartość jego nie jest stała i zależy od wielu czynników w tym: rodzaju włókien i kształtu, zawartości uzbrojenia, składu matrycy, wielkości próbki, sposobu obciążenia, dokładności pomiaru odkształceń, rodzaju urządzeń pomiarowych i innych. Wykorzystanie tej miary do oceny kompozytów uzbrojonych włóknami jest niewystarczające, z powodu złożonego procesu ich niszczenia. Innym sposobem oceny jest miara osiowego rozciągania próbki ϵ_{kr} . Materiał uznawany jest za kruchy, gdy $\epsilon_{kr} < 1\%$ [81]. W kompozytach cementowych powstanie pierwszego zarysowania odpowiada odkształceniu rzędu 0,02%, wobec czego jest to materiał kruchy. Do oceny kruchości proponowane są również wielkości związane z liniową mechaniką pękania [11]:

G_c - wartość krytyczna współczynnika wyzwalamia energii sprężystej [N/m]

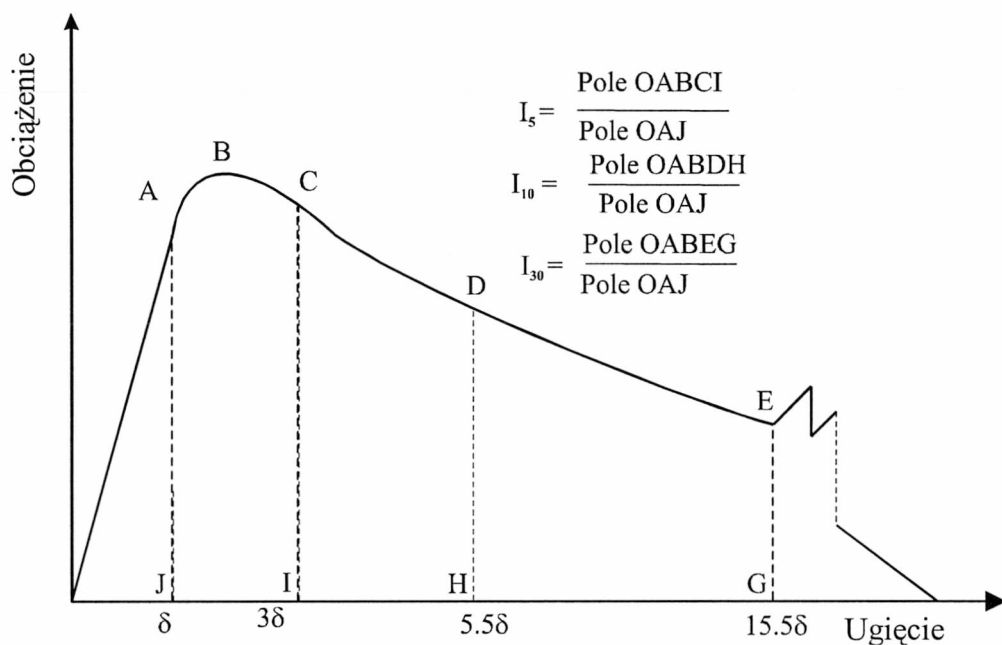
K_{Ic} - wartość krytyczna współczynnika intensywności naprężeń [$MN/m^{3/2}$]

l_{ch} -długość charakterystyczna [mm]

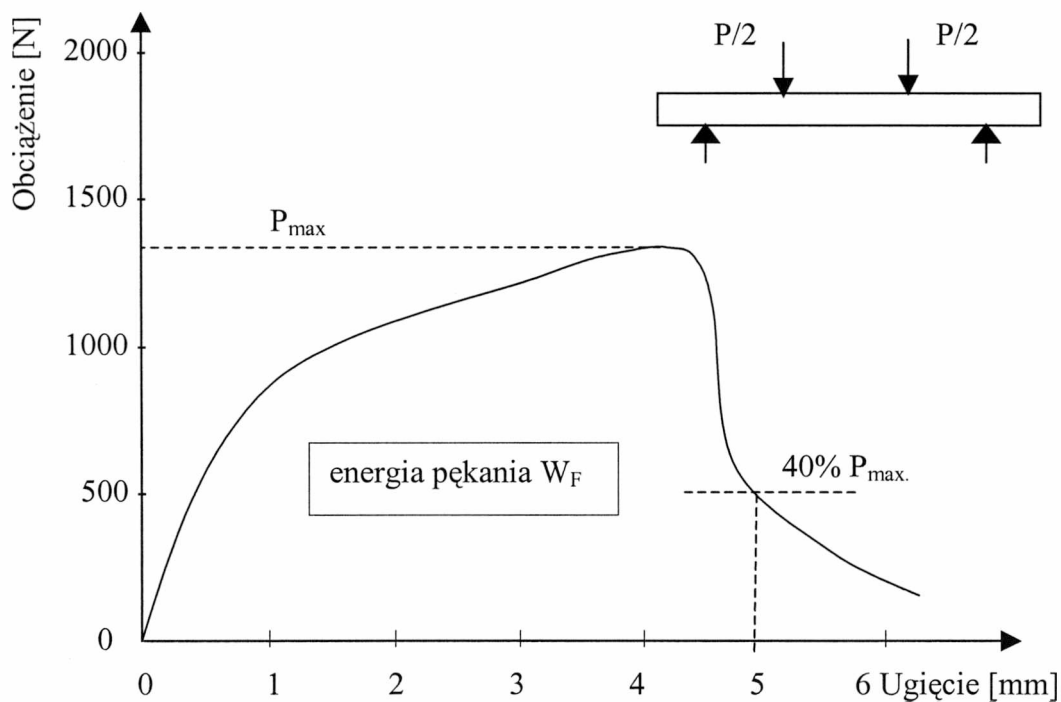
Nieliniowość odkształceń kompozytów cementowych z uzbrojeniem ogranicza przydatność wymienionych sposobów oceny kruchości. Stwierdzono, że najbardziej miarodajną jest energia pękania, rozumiana jako pole powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie w próbie zginania. Według amerykańskiej normy ASTM C 1018 [82], odporność na pękanie przy zginaniu ocenia się przez porównanie badanej próbki, z zachowaniem się materiału idealnie sprężystego za pomocą wskaźników I_5 , I_{10} , I_{30} , rys.2.29. Zgodnie z zaleceniami RILEM [83], stosowane są również miary bezwzględne takie jak energia pękania W_F , definiowana jako praca sił zewnętrznych w próbie zginania, której odpowiednikiem jest flexural toughness, rys.2.30. Na podstawie krzywej obciążenie-ugięcie wyznacza się pole powierzchni pod wykresem do 40 % obciążenia maksymalnego, przy ugięciu osiągającym 1/10 rozpiętości belki. Zalecany stosunek rozpiętości między podporami, do wysokości próbki, wynosi co najmniej 20. Drugi wariant uwzględnia działanie naprężeń ścinających, przy czym stosunek ten jest trzy razy mniejszy. Podobne efekty ścinania, w badaniach odporności na pękanie przy zginaniu, uwzględnione są w normach japońskiej i belgijskiej [84,85].

Z przeprowadzonej analizy [44] wynika, że dokładność metody pomiaru ma bezpośredni wpływ na uzyskiwane wskaźniki odporności na pękanie przy zginaniu. Za

miarodajne wyniki uznano te, które były wykonywane przy użyciu mocowania (ang., „Yoke”) miernika w osi obojętnej próbki, bowiem w pozostałych przypadkach pomiar obejmował również efekty uboczne, uniemożliwiające porównanie uzyskiwanych rezultatów [44, 86].

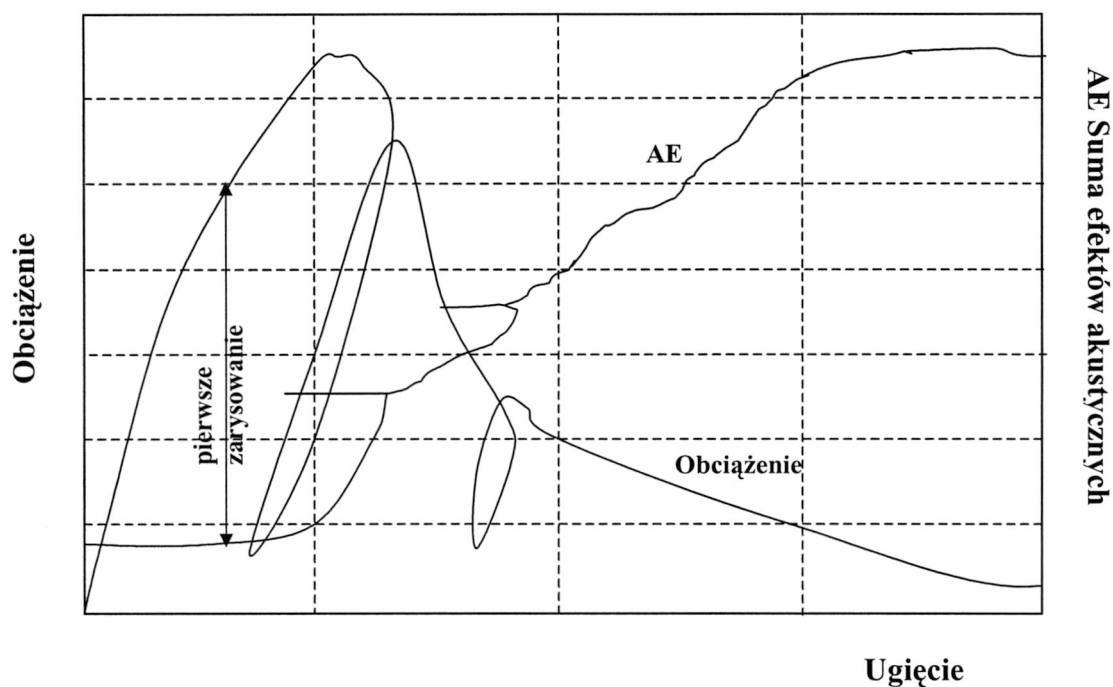


Rys.2.29 Sposób obliczania wskaźników ASTM [82]



Rys.2.30 Definicja energii pękania według RILEM [83]

Precyzyjne wyznaczenie ugięcia i siły odpowiadającej pierwszemu zarysowaniu stanowi trudność w ocenie kruchości. Ustalenie pierwszego zarysowania może być ułatwione pomiarem emisji akustycznej AE, ponieważ występuje korelacja między krzywą obciążenie-ugięcie a sumą efektów akustycznych, rys.2.31 (Brandt, Glinicki [87], Kucharska, Brandt [33]). Skuteczność zastosowania tej metody do oznaczenia pierwszego zarysowania, w kompozytach z rozproszonym uzbrojeniem, potwierdzono w pracy [88].



Rys.2.31 Wykresy obciążenia i sumy efektów akustycznych (AE) w funkcji ugięcia próbek (HPFRC) poddanych zginaniu [88]

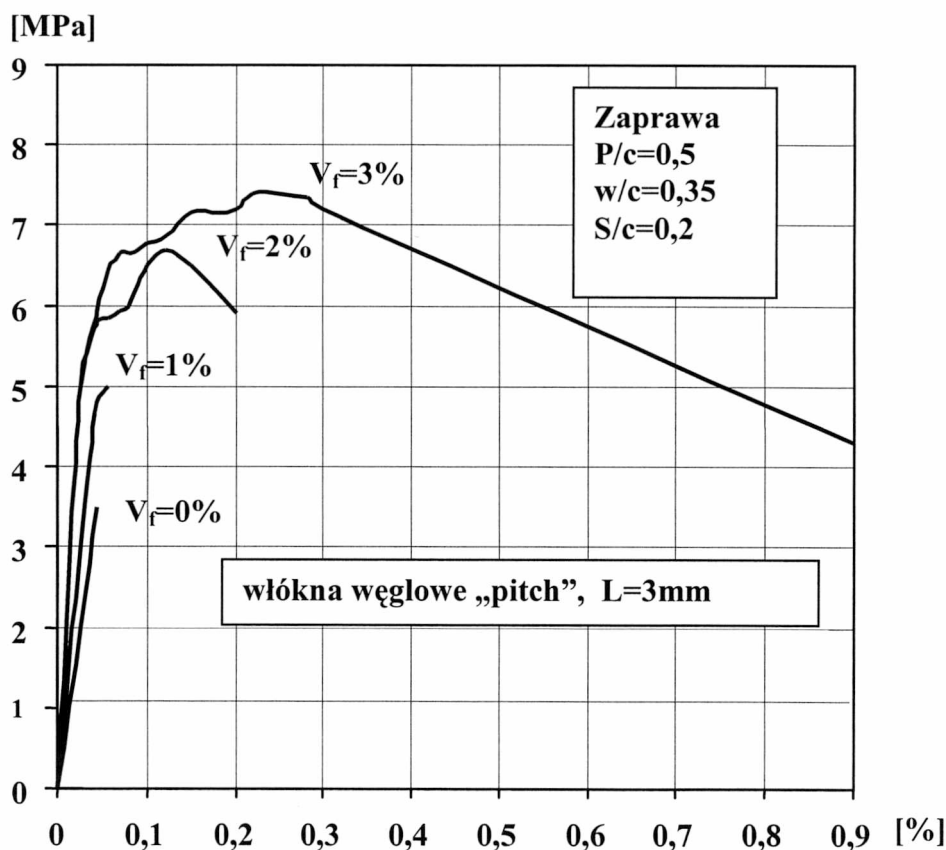
2.3.5 Efekt uzbrojenia włóknami, wpływ starzenia

Wytrzymałość na ściskanie

Wpływ włókien na wytrzymałość na ściskanie f_c kompozytów uzbrojonych niskomodulowymi włóknami węglowymi nie jest jednoznaczny. Według jednych autorów, włókna nieznacznie obniżają wytrzymałość (Banthia [60]) natomiast inni wskazują na jej wzrost (Ohama [13]). Zgodnie z wynikami badań (Kucharska [67]), wpływ włókien na f_c zależy od ich zawartości. Przy $V_f < 0,5\%$ ($w/c=0,3$) występuje wzrost f_c , powyżej podanej zawartości wytrzymałość maleje. Dokładna granica podziału zależy od właściwości mechanicznych samej matrycy. Stwierdzony wzrost wytrzymałości przy niewielkiej zawartości V_f wyjaśniono absorpcją dodatkowej energii w wyniku zrywania włókien, natomiast spadek f_c przy większej ich zawartości - osłabieniem matrycy włóknami [90].

Wytrzymałość na rozciąganie

Z dotychczasowych prac wynika, że wzrost wytrzymałości na rozciąganie zwiększa się wraz z zawartością włókien (Ohama [10], Banthia [89] i Akihama [91]). Stwierdzono (rys. 2.32 [9]),



Rys.2.32 Naprężenie-odkształcenie podczas osiowego rozciągania uzbrojonej zaprawy (Banthia i Genois [9])

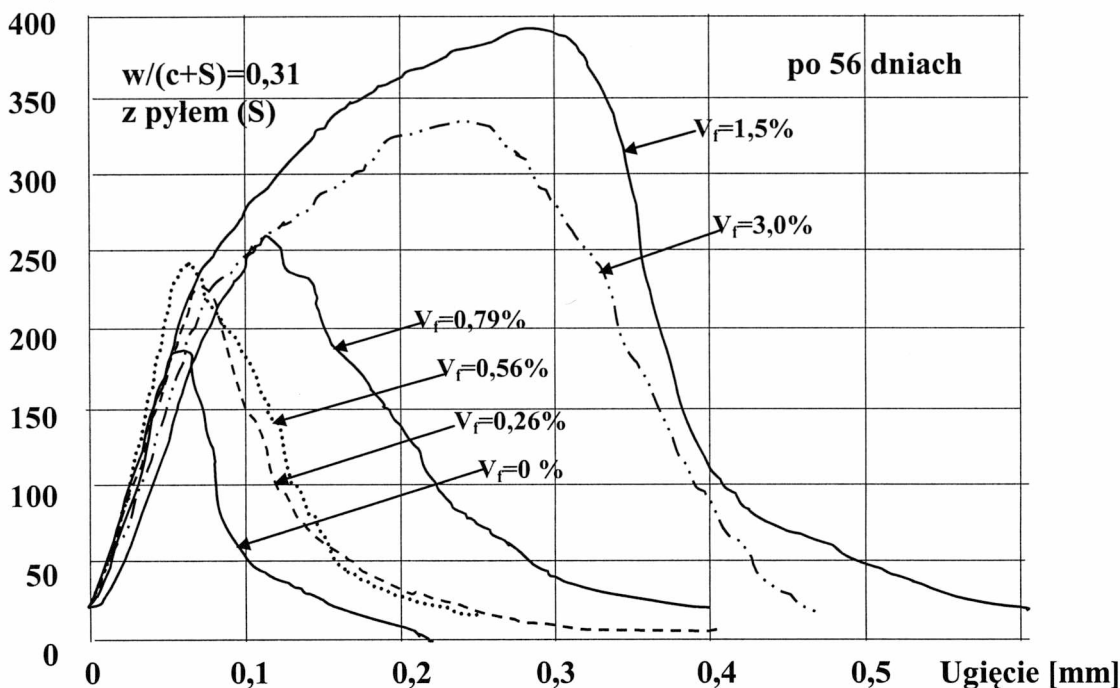
że już przy dodaniu niewielkiej ilości włókien ($V_f=1\%$) następuje znacząca poprawa wytrzymałości na rozciąganie. Przy tej zawartości uzbrojenia większość włókien ulega zerwaniu i tylko niewielka ich ilość jest wyciągana. Zachowanie się kompozytów jako typowych HPFRC zaobserwowano przy zawartości włókien V_f większej niż 2%.

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

W badaniach HPFRC pod obciążeniem, znaczący wzrost absorpcji energii następował przy zawartości włókien przekraczającej 1% (Ohama [10], Pu-Woei Chen i Chung [92]). Z prowadzonych badań (Kucharska, Brandt [67,69], Banthia [39]) wynika, że przy zawartości włókien poniżej 1% efekt wzmocnienia kompozytu jest niewielki, a do zwiokrotnionego zarysowania wymagane jest około $1\%V_f$, dla badanego składu matrycy, rys.2.33 [4,5].

W tabelicy 2.7 zestawiono wyniki f_t i f_{zg} dla zaczynów cementowych uzbrojonych niskomodułowymi włóknami węglowymi.

Obciążenie [N]



Rys.2.33 Obciążenie-ugięcie kompozytu typu zapraw (MS/1), przy różnych wartościach V_f , po 56 dniach [4,33]

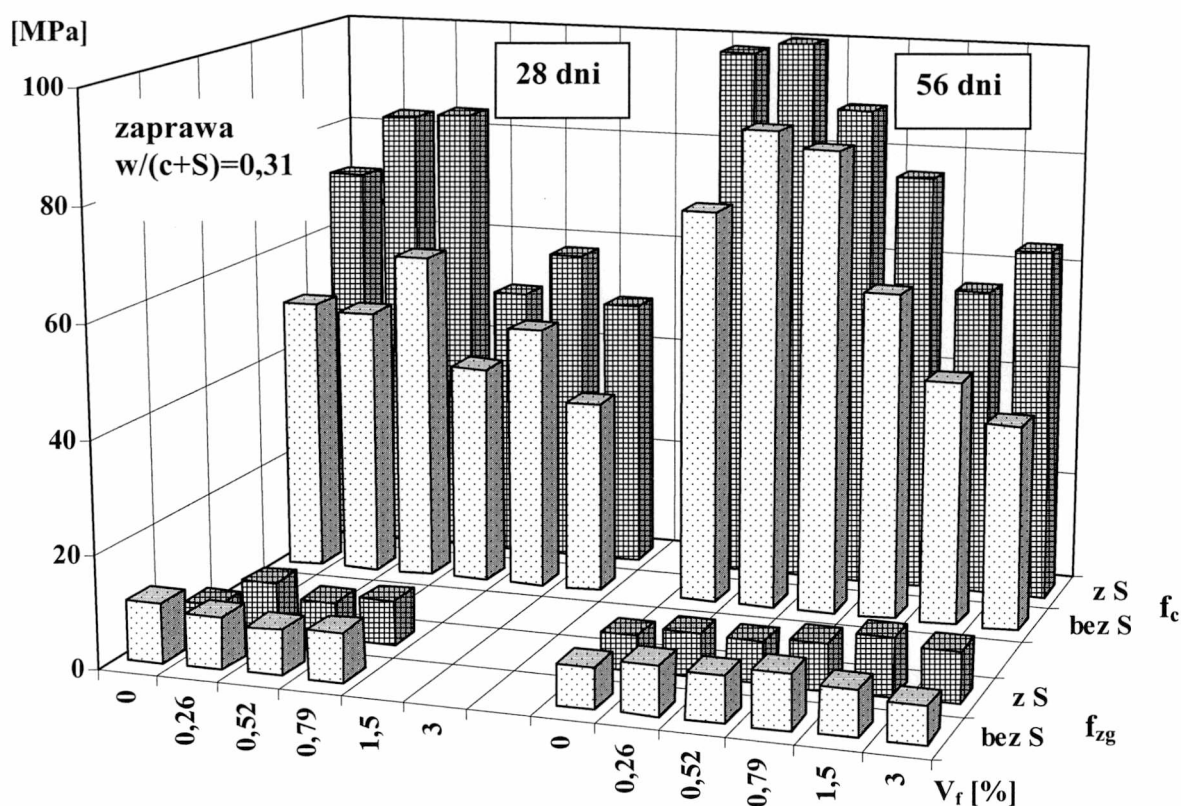
Tablica 2.7 Zwiększenie wytrzymałości f_t i f_{zg} kompozytów HPFRC z włóknami węglowymi typu „pitch”, wg [17]

Autor	V_f [%]	L [mm]	w / c	S/c	Wzrost f_t [%]	Wzrost f_{zg} [%]
Akihama [93]	2,1	3	0,47	0,25	30	125
	4,2	3	0,47	0,25	60	210
	5,3	3	0,47	0,25	150	270
Ohama [10]	1	3	0,3	0,40	35	50
	3	3	0,3	0,40	180	260
	5	3	0,3	0,40	270	340
	1	10	0,3	0,40	15	40
	10	0,30	0,4	125	150	-
	5	10	0,3	0,4	200	340
Akichama [95]	1,72	10	0,42	-	40	-
	3,18	10	0,42	-	90	-
	3,98	10	0,42	-	110	-
	2,04	10	0,3	-	70	-
	4,03	10	0,3	-	120	-
Linton [67]	1,65	6	0,37	0,195	-	165
	2	6	0,37	0,195	-	165
	2	6	0,21	0,195	-	90
	2	6	0,21	0,195	-	90
Park [96]	1	3	0,3	0,4	105	-
	2	3	0,3	0,4	150	-
	3	3	0,3	0,4	180	-
Banthia [97]	1	6	0,3	-	-	250
	3	6	0,3	-	-	360
	5	6	0,3	-	-	375

Wpływ starzenia

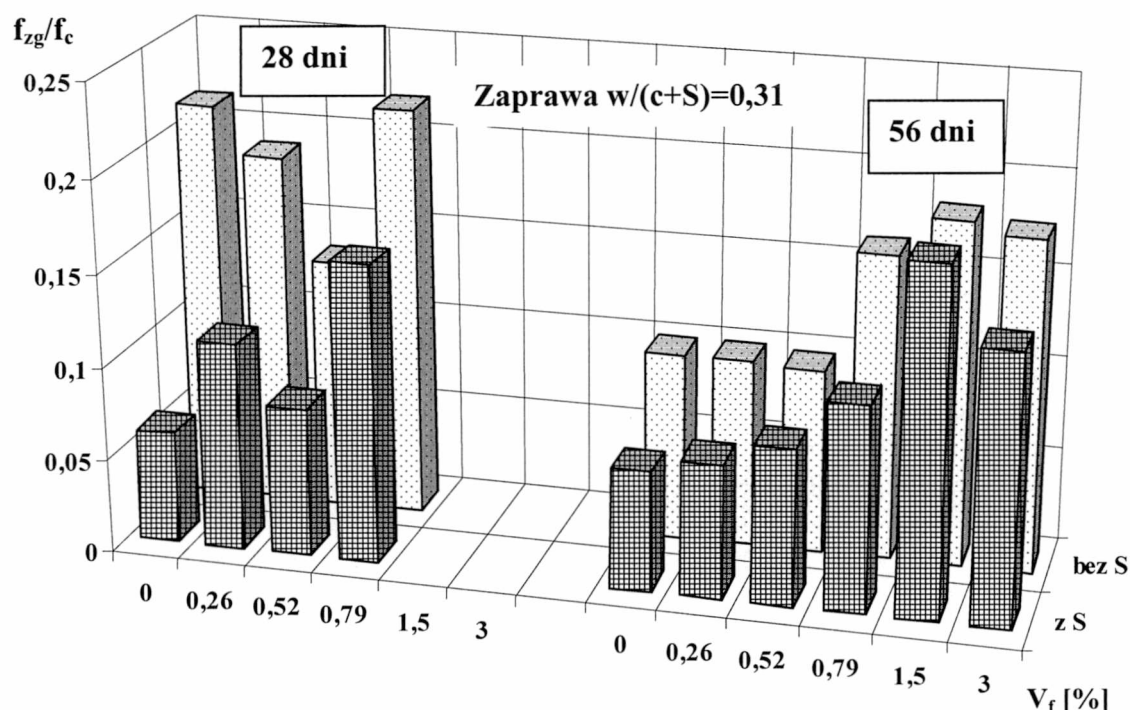
Z dotychczasowych badań wynika, że skuteczność działania włókien w postaci rozproszonego uzbrojenia, oprócz ich rodzaju i zawartości, zależy głównie od wiązania matryca-włókno, które wzrasta ze zmniejszeniem w/c [4,15]. Niewielki dodatek pyłu krzemionkowego, popiołu lotnego, metylocelulozy czy latexu, powoduje wzrost w czasie wytrzymałości matrycy i wiązania matryca-włókno [4,74,76]. Podobne zjawisko stwierdzono w wyniku modyfikacji powierzchni włókna ozonem, obróbką NaOH, H₂O₂, itp. [68]. Jednak zbyt mocne wiązanie może powodować przedwczesne zrywanie włókien, redukując znacznie efekt wzmocnienia (Katz [80], Katz i Bentur [62,86]).

Większość publikowanych wyników badań kompozytów cementowych, w tym zawierających pył krzemionkowy, dotyczy próbek badanych po 28 dniach twardnienia. Stwierdzony [4,15,66] przyrost wytrzymałości f_c tych kompozytów po czasie dłuższym niż 28 dni, wywołuje zmianę oddziaływań włókno-matryca, w wyniku czego zmniejsza się efekt uzbrojenia, maleje stosunek f_{zg}/f_c z upływem czasu, rys.2.34-2.35.



Rys.2.34 Wpływ czasu twardnienia na wytrzymałość na ściskanie i zginanie (f_c , f_{zg}) kompozytów typu zapraw (M/1, MS/1), na podstawie [4]

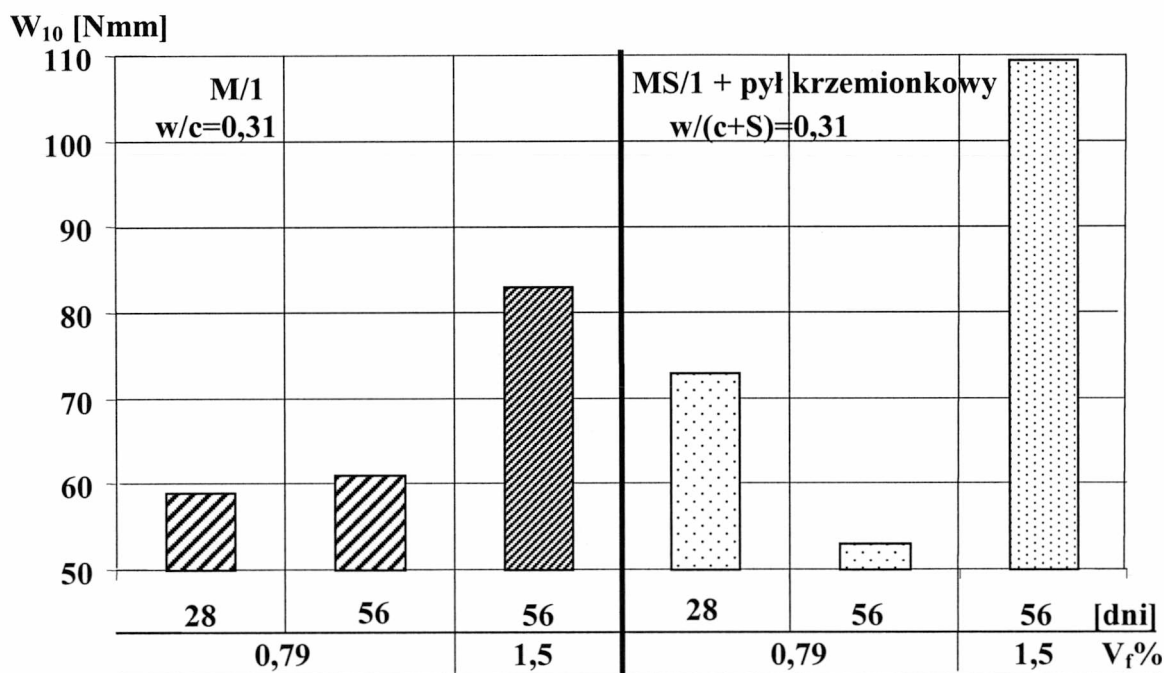
Wyniki badań [4] wskazują, że efekt uzbrojenia mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania występujący po 28 dniach przy $V_f=0,75\%$ zanika po 56, rys.2.35. Stwierdzone zwiększenie odporności na pękanie po 28 dniach w próbkach z pyłem krzemionkowym, mierzone energią całkowitą W_{10} i jej zmniejszenie o 40% po 56 dniach, wyjaśniono wzrostem wytrzymałości matrycy w czasie i odpowiednio zwiększeniem liczby zrywanych włókien. Uzasadnia to rozbieżności między teoretycznie wyznaczoną ilością włókien V_{fkr} a rzeczywiście potrzebną do uzyskania trwałego efektu wzmocnienia.



Rys.2.35 Wpływ czasu twardnienia na stosunek wytrzymałości na zginanie do wytrzymałości na ściskanie f_{zg}/f_c (na podst. [4])

Spadek wytrzymałości na rozciąganie tych kompozytów nie został potwierdzony pogorszeniem matrycy czy mikrobrojenia, tylko znaczącym wzrostem wytrzymałości f_c i wiązania matryca-włókno (Kucharska [4], Katz [98]). Ustalono, że minimalna zawartość uzbrojenia, niezbędna do zwiększenia odporności na pękanie mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania, wyznaczona po 28 dniach, jest niewystarczająca i zanika po 56 dniach z pyłem krzemionkowym, rys.2.36. Wynika z tego, że do uzyskania zwielokrotnionego zarysowania potrzebna jest odpowiednio większa zawartości włókien, przy której zmniejsza się prawdopodobieństwo ich pękania. Wykazano, że ze względu na słabe wiązanie matryca-włókno, kompozyty bez mikrowypełnienia w postaci pyłu krzemionkowego

nie ujawniają odpowiednio dużego (w stosunku do zawartości uzbrojenia) efektu wzmocnienia mechanizmem wielokrotnionego zarysowania [74]. Stwierdzono również, że źle rozproszone włókna zmniejszają efekt wzmocnienia (rys.2.33, por. $V_f=1,5\%$ i $V_f=3,0\%$).



Rys.2.36 Całkowita energia pękania W_{10} kompozytów typu zapraw (M/1, MS/1) w zależności od zawartości włókien węglowych „pitch” po 28 i 56 dniach twardnienia (na podstawie [4])

2.4 Podsumowanie

W większości aplikacyjnych prac dotyczących kompozytów zbrojonych włóknami, uwaga koncentruje się głównie na relacji zawartość włókien-odporność na pękanie. Badania ukierunkowane są najczęściej na poznanie warunków, których spełnienie jest niezbędne do otrzymania wysokowartościowych kompozytów HPFRC, w których włókna kontrolują inicjację rys, zwiększają odkształcalność oraz zdolność do przenoszenia zwiększonych obciążeń po zarysowaniu.

Przy uwzględnieniu, że o mostkowaniu mikrorys decyduje odległość między włóknami, teoretycznie ich zawartość i stosunek L/d powinny być tak duże, jak tylko jest to możliwe, natomiast ze względu na urabialność, jak najmniejsze. W praktyce dąży się do kompromisu między właściwościami reologicznymi mieszanek z włóknami i poprawą ich właściwości mechanicznych. Kompromis taki zmienia się w szerokim zakresie odpowiednio do rodzaju, geometrii i ilości włókien, składu cementowej matrycy, procesu technologicznego i przeznaczenia kompozytu.

Ze zwiększeniem ciekłości mieszanek domieszkami mineralnymi i chemicznymi, tradycyjne sposoby pomiaru parametrów reologicznych (stożek Abramsa, Ve-Be, rozplływ) okazują się niewystarczające. Wykorzystanie nowej generacji wiskozymetrów obrotowych do badań mieszanek, w tym z włóknami, pozwala określić parametry reologiczne w oparciu o dwuparametrowy model Bingham, który można wykorzystać do optymalizowania składów. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że z liniowym pogarszaniem urabialności mieszanek zmniejsza się efekt uzbrojenia włóknami w stosunku do ich zawartości co powoduje, że minimalna niezbędna zawartość włókien wynikająca z teoretycznych obliczeń jest znacznie mniejsza od rzeczywiście wymaganej. Różnice te związane są między innymi z trudnościami rozproszenia w środowisku wodnym hydrofobowych włókien. Problem ten częściowo rozwiązany jest dodatkiem superplastyfikatora, pyłu krzemionkowego, wydłużeniem czasu mieszania oraz użyciem specjalnych urządzeń mieszających.

Wpływ niejednorodnego rozproszenia włókien oraz ich pękanie sprawiają, że pomiarami właściwości mechanicznych po 28 dniach nie można określić niezbędnej ich zawartości. Stwierdzone zmiany w czasie f_c matrycy, zwłaszcza z dodatkiem aktywnego mikrowypełnienia, wymagają zwiększenia zawartości włókien niezbędnej do zachowania efektu zwielokrotnionego zarysowania. Z przeglądu literatury wynika, że brak jest badań nad możliwością wykorzystania właściwości reologicznych mieszanek cementowych z włóknami do określenia niezbędnej ich zawartości oraz brak powiązań zależności między właściwościami reologicznymi a efektem wzmocnienia kompozytów.

3. Badania własne

3.1 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest poznanie, czy metodą badań właściwości reologicznych mieszanek można ustalić niezbędną ilość włókien do wystąpienia trwałego efektu zwielokrotnionego zarysowania, aby uzyskać materiał o dużej odporności na pękanie.

Zakres pracy obejmuje:

- poznanie wpływu mikrowypełnienia oraz uziarnienia i zawartości drobnego kruszywa na właściwości reologiczne wysokowartościowych matryc cementowych, ich udziału w rozpraszaniu włókien i kształtowaniu mechanicznych właściwości kompozytów,
- ustalenie, czy występuje zależność, między parametrami reologicznymi mieszanek a właściwościami mechanicznymi kompozytów, w tym odporności na kruche pękanie,
- wyznaczenie metodą badań reologicznych niezbędnej i maksymalnej ilości włókien możliwej do rozproszenia w matrycach o określonych składach.

3.2 Tezy

- Właściwości reologiczne mieszanki z zawartością włókien odpowiadającą zwielokrotnionemu zarysowaniu kontrolowane są wzajemnym oddziaływaniem włókien.
- Uzyskanie dużego efektu zwielokrotnionego zarysowania, z którym wiąże się wzmocnienie kompozytu po zarysowaniu, uwarunkowane jest dostosowaniem wytrzymałości wysokowartościowej matrycy do parametrów włókien.
- Efektywność rozproszonego mikrozbrojenia zależy od wielkości ziaren wypełnienia.

3.3 Materiały i ich charakterystyka

Do badań użyto następujące materiały:

spoiwo

- cement mostowy M45 (klasy 42,5), z cementowni Rejowiec (tab.3.1),

mikrowypełnienie

- pył krzemionkowy z huty „Łaziska” (tab.3.1),
- niskowapniowy popiół lotny (F) z elektrociepłowni „Czechnica” w Siechnicy (tab.3.1),

wypełnienie

- frakcje piasku: <1 mm, <0,5mm, <0,25mm, wydzielone z normowego, $\rho=2,65\text{Mg/m}^3$ (rys.3.2),

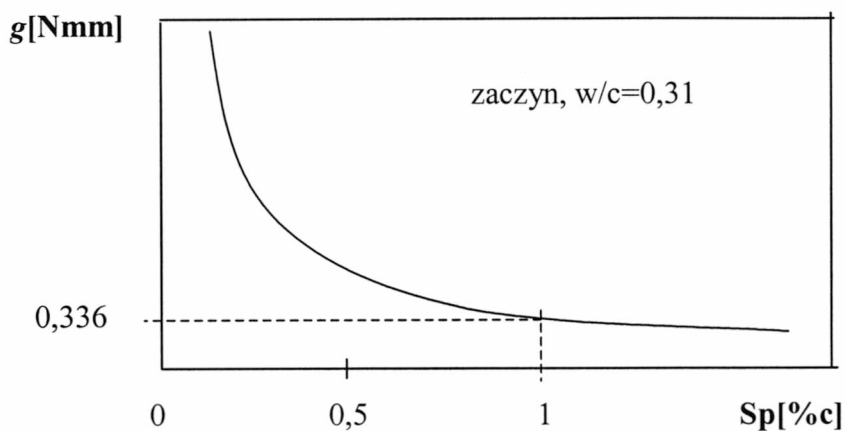
włókna

- niskomodułowe włókna węglowe typu „pitch” (tab.3.2, rys.3.3),
- włókna szklane, pasmo typu Cem-Fil 62/2 (tab.3.2, rys.3.4).

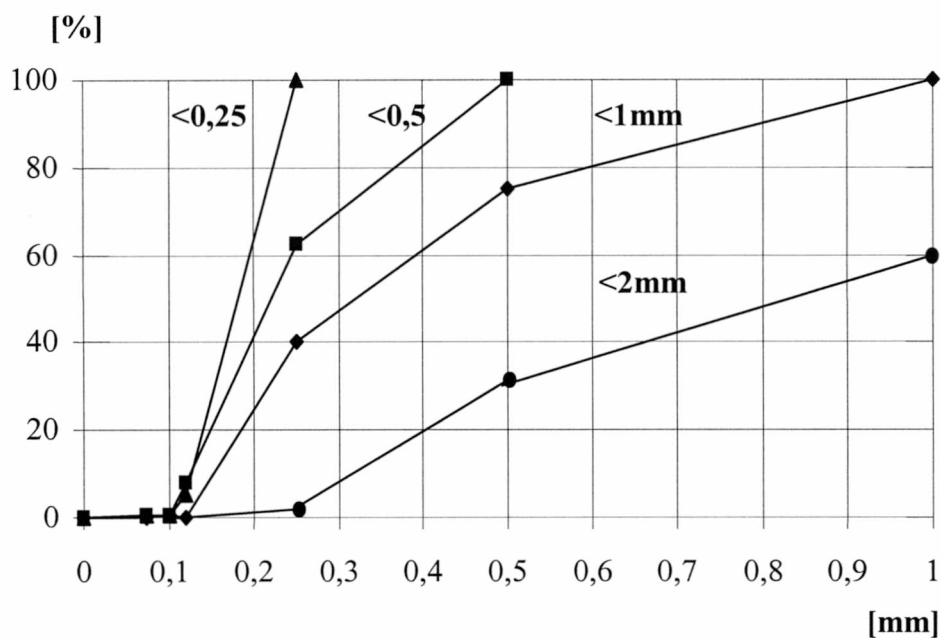
Do zarobu stosowano wodę wodociagową oraz superplastyfikator (Sp) Melment L10, $\rho=1,21\text{ Mg/m}^3$ (roztwór wodny 40%). Optymalną zawartość Sp (1% masy cementu) wyznaczono na zaczynie (w/c=0,31) z zależności granica płynięcia (g) - zawartość Sp[%], rys.3.1.

Tablica 3.1 Skład i właściwości fizyczne podstawowych składników

	Cement	Pył krzemionkowy	Popiół
Składnik [%]	C ₃ A - 3,5 Na ₂ O - 0,11	SiO ₂ -93,0 C - 0,4	SiO ₂ - 52,5 ; SO ₃ - 0,5 Al ₂ O ₃ - 26,0 ; Na ₂ O -0,7 Fe ₂ O ₃ - 7,85 ; MgO -2,7 CaO - 3,5
Właściwości			
Gęstość [Mg/m³]	3,17	2,22	2,15
Pow. właściwa [m²/kg]	360	18000	-
Uziarnienie [mm]	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 0,035 \cdot 10^{-2}$	$< 0,44 \cdot 10^{-2}$
Subst. organiczne [%]	-	-	<1,0



Rys.3.1 Zależność parametru g (granicy płynięcia) od zawartości S_p , $w/c=0,31$

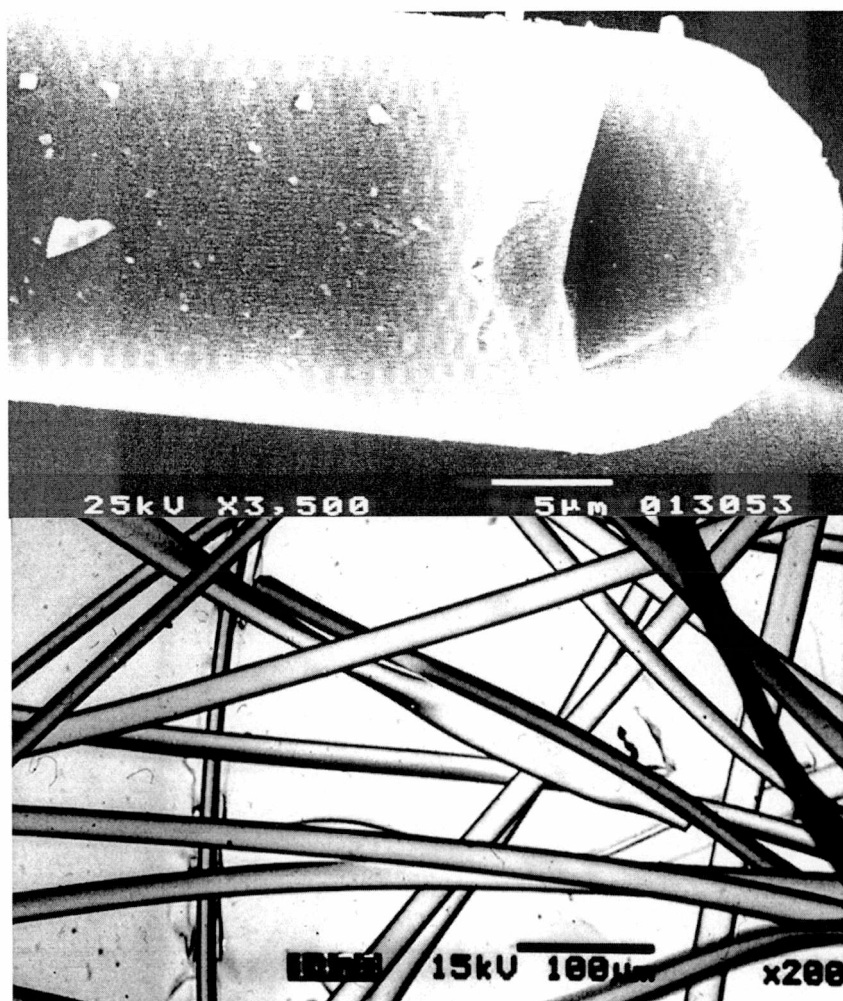


Rys.3.2 Skład ziarnowy piasku normowego i wydzielonych frakcji

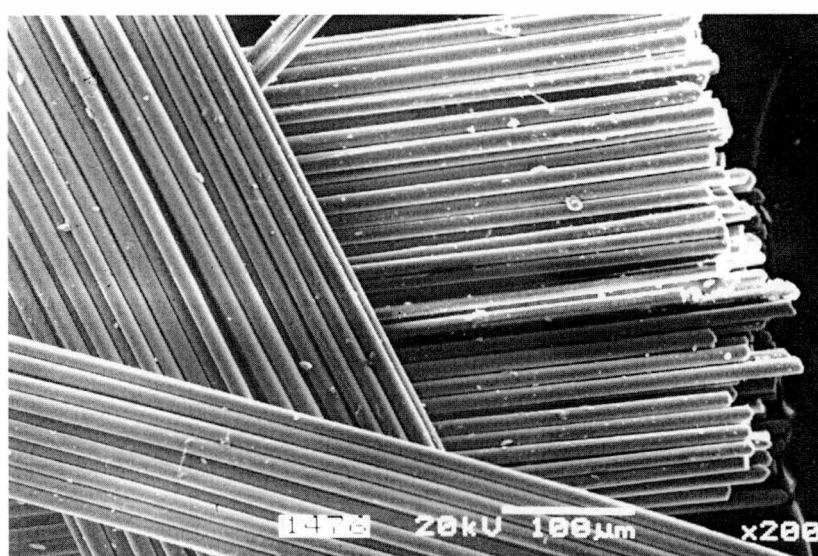
Tablica 3.2. Charakterystyka włókien

Rodzaj	Gęstość ρ [Mg/m ³]	Dług. L [mm]	Średnica d [μ m]	Wytrż. na rozciąg. f_t [MPa]	Moduł Younga, E [GPa]	Wydłuż. ε [%]	Parametr L/d
Węglowe (Pitch)	1,65	3	18 (14)	590	30	2	167 (214)
Szklane (Cem-FIL)*	2,68	12	14	1700	72	2	857

*Pasma z włókien szklanych Cem-FIL 62/2 (Integral) składa się z 32 włókien elementarnych



Rys.3.3 Włókna węglowe typu „pitch”



Rys.3.4 Pasma włókien szklanych alkalioodpornych Cem-FIL (Integral)

3.4 Badane składy

Składy matryc

Mając na uwadze, że możliwa do rozproszenia ilość włókien jest kontrolowana urabialnością matryc skomponowano składy zaczynów (Z) i zapraw (M), których celem było poznanie wpływu pyłu krzemionkowego (S) oraz zawartości i wielkości ziaren piasku (P) na właściwości reologiczne, fizyczne i mechaniczne matryc.

Przyjęto za stałe:

- stosunek wody do cementu $w/c=0,31$, z pyłem krzemionkowym, $w/b=0,28$,
- superplastyfikator: 1% dla matryc bez pyłu krzemionkowego, 0,75% z pyłem,
- pył krzemionkowy (S), 10% masy cementu.

Zmienne:

- uziarnienie piasku $<0,25\text{mm}$; $<0,5\text{mm}$ i $<1\text{mm}$,
- wypełnienie: stosunek piasku do cementu $P/c=0\div 1,5$.

Zestawienie składów przedstawia tablica 3.3.

Tablica 3.3 Składy matryc-zaczynów i zapraw, piasek ($d_{\max}$) $<0,25$; $<0,5$ i $<1\text{mm}$, bez i z pyłem (S)

Oznaczenie	w/c	w/b	Vp/Vz	P/c	$d_{\max}$ [mm]	S [%]
Z	0,31	0,31	—	—	—	—
ZS	0,31	0,28	—	—	—	10
M/1	0,31	0,31	0,90	1,5	1	—
MS/1	0,31	0,28	0,77	1,5	1	10
M/0.5	0,31	0,31	0,45	0,75	0,5	—
M/0.25	0,31	0,31	0,45	0,75	0,25	—
MS/1	0,31	0,28	0,35	0,75	1	10
MS/0.5	0,31	0,28	0,35	0,75	0,5	10
MS/0.25	0,31	0,28	0,35	0,75	0,25	10
MS/0.25	0,31	0,28	0,21	0,5	0,25	10
M/0.5	0,31	0,31	0,15	0,25	0,5	—
M/0.25	0,31	0,31	0,15	0,25	0,25	—
MS/1	0,31	0,28	0,07	0,25	1	10
MS/0.5	0,31	0,28	0,07	0,25	0,5	10
MS/0.25	0,31	0,28	0,07	0,25	0,25	10

Składy kompozytów

W pierwszym etapie badań matryce typu zapraw (M) bez i z pyłem krzemionkowym (MS), o największej zawartości piasku $P/c=1,5$ i z największym ziarnem $<1\text{mm}$, uzbrojono niskomodułowymi włóknami węglowymi typu „pitch”.

Przyjęto za stałe:

- stosunek wody do cementu $w/c=0,31$ (stosunek wody do spoiwa: $w/b=0,31$ bez pyłu krzemionkowego, $w/b=0,28$ z pyłem),
- stosunek objętościowy piasku do objętości zaczynu $V_p/V_z=0,19$ bez pyłu krzemionkowego, $(V_p+S)/V_z = 0,28$ z pyłem,
- superplastyfikator 1% masy cementu,
- uziarnienie piasku $<1\text{mm}$,
- pył krzemionkowy (S), 10% masy cementu.

Przyjęto jako zmienne:

- dodatek włókien $V_f=0-3\%$ ($L=14\mu\text{m}$).

Zestawienie składów przedstawia tablica 3.4.

Tablica 3.4 Składy mieszanek - zaprawy, piasek ($d_{\text{max}}<1\text{mm}$, bez i z pyłem (S), $V_f=0-3\%$

Oznaczenie	w/c	w/b	V_p/V_z	P/c	d_{max} [mm]	S [%]	V_f [%]
M/1	0,31	0,31	0,19	1,50	1	—	—
MV _{0.26} /1	0,31	0,31	0,19	1,36	1	—	0,26
MV _{0.52} /1	0,31	0,31	0,19	1,35	1	—	0,52
MV _{0.79} /1	0,31	0,31	0,19	1,34	1	—	0,79
MV _{1.5} /1	0,31	0,31	0,19	1,32	1	—	1,5
MV _{3.0} /1	0,31	0,31	0,19	1,30	1	—	3,0
MS/1	0,31	0,28	0,28	1,40	1	10	—
MSV _{0.26} /1	0,31	0,28	0,28	1,36	1	10	0,26
MSV _{0.52} /1	0,31	0,28	0,28	1,35	1	10	0,52
MSV _{0.79} /1	0,31	0,28	0,28	1,34	1	10	0,79
MSV _{1.5} /1	0,31	0,28	0,28	1,32	1	10	1,5
MSV _{3.0} /1	0,31	0,28	0,28	1,30	1	10	3,0

Celem zmniejszenia wzrostu wytrzymałości matrycy w czasie (znaczny przyrost wytrzymałości f_c próbek z pyłem krzemionkowym, składy tab.3.3-3.4) i ograniczenia zrywania włókien w próbach zginania, część cementu podstawiono niskowapniowym popiołem lotnym (typ F).

Przyjęto za stałe:

- stosunek wody do spoiwa $w/b=0,31$,
- pył krzemionkowy (S), 10% masy cementu

Przyjęto jako zmienne:

- dodatek popiołu (A), 10, 20, 30 % obj. cementu,
- dodatek włókien $V_f=0-3\%$,
- uziarnienie piasku $<0,5$ mm, <1 mm,
- wypełnienie: stosunek piasku do cementu $P/c=0,25\div 1,65$.

Składy matryc bez i z popiołem lotnym oraz z włóknami podano w tab.3.5.

Tablica 3.5 Składy mieszanek z popiołem - zaprawy, piasek ($d_{\max}$) <1 ; $<0,5$ mm, bez i z popiołem (A), $V_f=0-3\%$

Oznaczenie	w/c	w/b	V_p/V_z	P/c	$d_{\max}$ [mm]	S [%]	A [%]	V_f [%]
MSA10/1	0,32	0,31	0,79	1,65	1	10	10	—
MSA20/1	0,35	0,31	0,79	1,85	1	10	20	—
MSA30/1	0,4	0,31	0,79	2,09	1	10	30	—
MSV _p 3/0.5	0,34	0,31	0,07	0,25	0,5	10	—	0-3
MSAV _p 3/0.5	0,41	0,31	0,07	0,33	0,5	10	30	0-3

Stwierdzono, że do wyraźnego zmniejszenia 28 dniowej wytrzymałości zaprawy potrzeba zastąpić nie mniej niż 30% cementu popiołem (A). Dla takiej zawartości popiołu, metodą badań reologicznych, wyznaczono maksymalnie możliwą do wprowadzenia zawartość włókien. Z zależności parametr g - zawartość włókien wynika, że w badanej matrycy można rozproszyć maksymalnie $2,5\%V_f$.

Mając na uwadze, że maksymalna możliwa do rozproszenia ilość włókien w badanych matrycach wynosi 2,5%, przygotowano składy celem ustalenia wpływu zawartości włókien w zakresie $0-2,5\%V_f$, na właściwości reologiczne mieszanek i fizyczno-mechaniczne kompozytów, z uwzględnieniem wpływu popiołu oraz uziarnienia piasku.

Przyjęto za stałe:

- stosunek wody do spoiwa $w/b=0,3$,
- pył krzemionkowy (S), 10% masy cementu,
- popiół (A), 30 % obj. cementu,
- ułamek obj. fazy stałej $\varphi_{st}=0,6$.

Przyjęto jako zmienne:

- dodatek włókien $V_f=0-2,5\%$,
- piasek o uziarnieniu $<0,25\text{mm}$; $<0,5\text{ mm}$,
- wypełnienie: stosunek piasku do cementu $P/c=0,25\div 0,58$.

Składy kompozytów przedstawia tablica 3.6.

Tablica 3.6 Składy kompozytów - zaprawy, piasek ($d_{\max}$) $<0,5$; $<0,25\text{mm}$, bez i z popiołem (A), $V_f=0-2,5\%$

OZNACZENIE	w/c	w/b	Vp/Vz	P/c	φ_{st}	$d_{\max}$ [mm]	S [%]	A [%]	V_f [%]
MS/0.25	0,33	0,3	0,15	0,28	5,7E-01	0,25	10	—	—
MSV _f 1.1/0.25	0,33	0,3	0,14	0,25	0,57	0,25	10	—	1,1
MSV _f 1.6/0.25	0,33	0,3	0,14	0,26	0,57	0,25	10	—	1,6
MSV _f 2.5/0.25	0,33	0,3	0,12	0,22	0,57	0,25	10	—	2,5
MSA/0.25	0,43	0,3	0,10	0,25	0,57	0,25	10	30	—
MSAV _f 1.1/0.25	0,43	0,3	0,09	0,23	0,57	0,25	10	30	1,1
MSAV _f 1.6/0.25	0,43	0,3	0,08	0,21	0,57	0,25	10	30	1,6
MSAV _f 2.5/0.25	0,43	0,3	0,07	0,18	0,57	0,25	10	30	2,5
MS/0.5	0,33	0,3	0,30	0,56	0,62	0,5	10	—	—
MSV _f 1.1/0.5	0,33	0,3	0,28	0,53	0,62	0,5	10	—	1,1
MSV _f 1.6/0.5	0,33	0,3	0,27	0,50	0,62	0,5	10	—	1,6
MSV _f 2.5/0.5	0,33	0,3	0,26	0,50	0,62	0,5	10	—	2,5
MSA/0.5	0,43	0,3	0,23	0,58	0,62	0,5	10	30	—
MSAV _f 1.1/0.5	0,43	0,3	0,22	0,57	0,62	0,5	10	30	1,1
MSAV _f 1.6/0.5	0,43	0,3	0,21	0,56	0,62	0,5	10	30	1,6
MSAV _f 2.5/0.5	0,43	0,3	0,21	0,52	0,62	0,5	10	30	2,5

Celem określenia wpływu piasku na efekt uzbrojenia, przygotowano mieszanki typu zaczynów bez i ze stałą zawartością włókien $V_f=2,5\%$. W mieszankach zachowano taką samą ilość pyłu krzemionkowego, popiołu lotnego i w/b, jak w odpowiadających im mieszankach typu zapraw, tab.3.6. Składy zaczynów przedstawia tablica 3.7.

Tablica 3.7 Składy matryc i kompozytów typu zaczynów, modyfikowane pyłem krzemionkowym (S), popiołem (A), $V_f=2,5\%$

OZNACZENIE	w/c	w/b	φ_{st}	S [%]	A [%]	V_f [%]
ZS	0,32	0,3	0,6	10	—	—
ZSA	0,43	0,3	0,6	10	30	2,5
ZV _f 2.5	0,3	0,3	0,6	—	—	2,5
ZSV _f 2.5	0,32	0,3	0,6	10	—	2,5
ZSAV _f 2.5	0,43	0,3	0,6	10	30	2,5

3.5 Przygotowanie próbek do badań

Przygotowanie mieszanek

Mieszanki do pomiaru właściwości reologicznych przygotowano tak, aby ograniczyć wpływ sposobu wprowadzania Sp na efekt upłynnienia. W tym celu część Sp dodawano do wody zarobowej, część z opóźnieniem do mieszanki. Kolejność dodawania składników wszystkich zarobów była jednakowa: woda (w) + połowa superplastyfikatora ($\frac{1}{2}$ Sp) + pył krzemionkowy (S) + popiół (A) + cement (c) + połowa superplastyfikatora ($\frac{1}{2}$ Sp) + piasek (P) + stopniowo włókna.

$$w + \frac{1}{2} \text{ Sp} + S + A + c + \frac{1}{2} \text{ Sp} + P + F$$

W celu lepszego rozproszenia, włókna przed dodaniem rozczesywano. Do przygotowania mieszanek użyto zwykłego mieszadła do zapraw. Całkowity czas mieszania składników liczony od chwili kontaktu cementu z wodą wynosił 15-17 minut w tym dwie ostatnie minuty z włóknami.

Bezpośrednio po zakończeniu mieszania część zarobu użyto do wyznaczenia krzywych płynięcia (400cm^3). Z pozostałej części formowano walce 30×30 mm do wyznaczenia podstawowych właściwości fizycznych i wytrzymałości na ściskanie. Do wyznaczenia krzywych obciążenie-ugięcie formowano płytki o wymiarach $20 \times 160 \times 160$ mm, które po 56 dniach twardnienia pocięto na beleczki $15 \times 20 \times 160$ mm. Czas zagęszczania próbek na stoliku wibracyjnym nie przekraczał 1 minuty.

Pielęgnacja próbek

Zaformowane próbki umieszczano w komorze wilgotnościowej, po 24 godzinach rozformowywano i do momentu przeprowadzenia badań przechowywano w wodzie nasyconej wodorotlenkiem wapna w temperaturze 293K.

3.6 Metody badań

Właściwości reologiczne

Badania reologiczne przeprowadzono przy użyciu wiskozymetru "Viskomat PC" ze sterowaną prędkością odkształcenia i pomiarem momentu wywołanego oporem mieszanki, rys.3.5. Sterowanie przebiegiem badania, rejestrację i obróbkę wyników prowadzono przy pomocy komputera IBM PC i programu „Visko”. W badaniach stosowano mieszadła o różnej geometrii odpowiednio do zaczynów i zapraw. Wyniki otrzymano w postaci krzywych płynięcia z wyznaczonymi parametrami reologicznymi g i h , odpowiadającymi : g -binghamowskiej granicy płynięcia (τ_0), h -lepkości plastycznej (η_{pl}). Analizę wyników oparto na bezpośrednio wyznaczonych parametrach g i h , wyznaczonych jako średnia z trzech prób.



Rys.3.5 Stanowisko badawcze do pomiaru parametrów reologicznych g i h

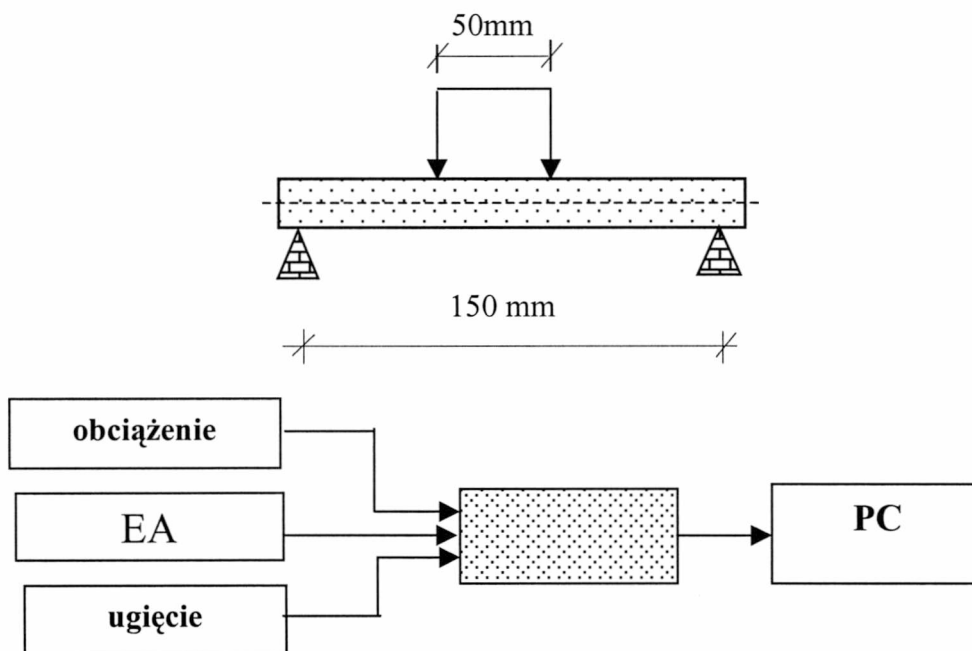
Właściwości fizyczne

Gęstość (ρ_p , pozorną), porowatość (p_o , otwartą), nasiąkliwość (n_w , wagową) oznaczono zgodnie z PN-76/B06714 na walcach 30x30mm. Oznaczenia dla matryc wykonano po 28 i 56 dniach twardnienia, natomiast kompozytów po 56. Za wynik końcowy przyjęto średnią z pięciu próbek.

Właściwości mechaniczne

Wytrzymałość na ściskanie - oznaczono zgodnie z PN-84/B04110, na walcach 30x30mm, po 28 i 56 dniach twardnienia matrycy i 56 dniach kompozytów, w maszynie wytrzymałościowej bez użycia podkładek, ze stałą prędkością obciążenia.

Krzywe obciążenie-ugięcie - wyznaczono zgodnie z ASTM C1018 na beleczkach 15x20x160mm, wyciętych z uprzednio wyformowanych płytek o wymiarach 20x160x160mm, przy czteropunktowym podparciu, rys.3.6. Pomiary przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1205, ze stałą prędkością przesuwu trawersy 0,05 mm/min. Pomiary ugięć belek (LUDT) mierzono względem osi obojętnej (zamocowanie „Yoke”, miernik ind. PSx 6, urządzenie PELTRON MPL 104, 10 V).



Obciążenie Instron : 1000N=10 Volt
Częstotliwość próbkowania 1 Hz

Rys.3.6 Schemat stanowiska badawczego wyznaczenia krzywych obciążenie-ugięcie i pomiaru emisji akustycznej*

*Badania wykonano w IPPT PAN, pod kierunkiem dr hab.inż. M.A.Glinickiego

Wykresy obciążenie-ugięcie wykorzystano do wyznaczenia:

- wytrzymałości odpowiadającej pierwszemu zarysowaniu f_{kr} ,
- wytrzymałości na zginanie f_{zg} ,
- ilości absorbowanej energii (W_{kr} , W_{max} , W_{10}), określonej zgodnie z wytycznymi RILEM [83] z tą różnicą, że ilość całkowitej energii W_{10} ograniczono wielkością pola powierzchni pod wykresem obciążenie w funkcji ugięcia, do 10% wartości maksymalnego obciążenia,
- współczynniki odporności na pękanie przy zginaniu wyznaczono na podstawie normy amerykańskiej ASTM C 1018 (ang. flexural toughness indices I_5 , I_{10} , I_{15}).

Wyznaczenie obciążenia odpowiadającego pierwszemu zarysowaniu nie jest dokładne, dlatego dodatkowo w próbach zginania rejestrowano emisję akustyczną zliczając uzyskane efekty w poszczególnych etapach obciążenia. Analizę wyników oparto na średniej z pięciu prób.

Stan włókien na przełomach po próbach zginania - powierzchnię przełomów analizowano w mikroskopie elektronowym Stereoscan 180 w Środowiskowym Laboratorium Mikroskopii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej.

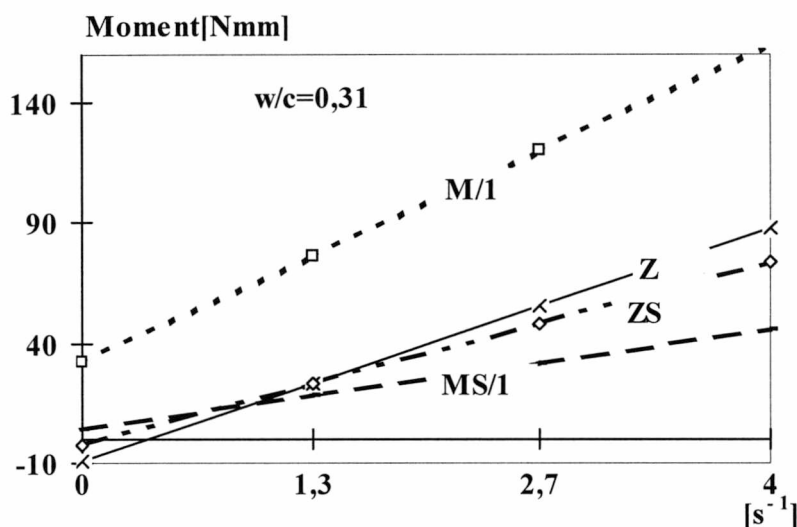
4. Wyniki i ich omówienie

4.1 Wpływ składu matryc i zawartości włókien na właściwości reologiczne mieszanek

4.1.1 Wpływ mikrowypełnienia

Wpływ pyłu krzemionkowego

Na rys. 4.1 przedstawiono wpływ pyłu krzemionkowego (S) na krzywe płynięcia zaczynu (Z) i zaprawy (M), będących podstawą modyfikacji matryc. Jak wynika z rysunku 4.1 zaczyn (Z), na którym oparto składy zapraw (tab.3.3), nie wykazuje granicy płynięcia i charakteryzuje się względnie dużą lepkością. Dodanie pyłu nieznacznie zmniejsza lepkość i zwiększa granicę płynięcia (ZS). Zmniejsza się skłonność do sedymentacji (wzrost g) i zmniejsza się opór do przepływu (maleje h).

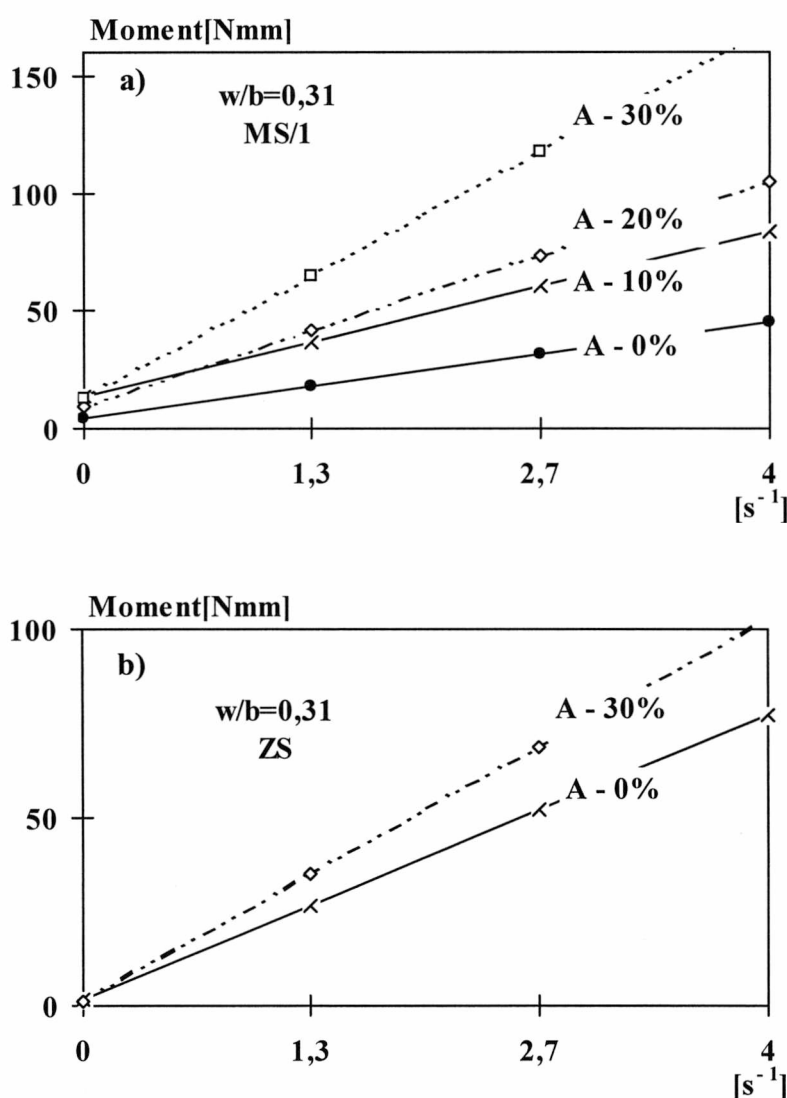


Rys.4.1 Wpływ pyłu krzemionkowego na krzywe płynięcia zaczynu (Z) i zaprawy (M)

Dodanie piasku do zaczynu jest szczególnie niekorzystne dla składu bez pyłu krzemionkowego M/1. Przy stałym w/c dodanie do wyjściowego zaczynu piasku ($<1\text{mm}$), znacznie zwiększa granicę płynięcia (parametr g) i niewiele zmienia lepkość (parametr h , por. krzywe Z z M/1, rys.4.1). Dodanie pyłu (S-10% masy cementu) eliminuje niekorzystny wpływ piasku. Jak wynika z rys.4.1 domieszka pyłu krzemionkowego do zaczynu lub zaprawy zmniejsza lepkość plastyczną (parametr h) i zgodnie z dotychczasowymi wynikami efekt ten jest dużo większy w zaprawach [54]. Wpływ pyłu na parametr g w zaprawie jest jakościowo podobny do zaczynu, jednak znacznie większy w wyniku zmniejszenia tarcia między ziarnami piasku.

Wpływ popiołu

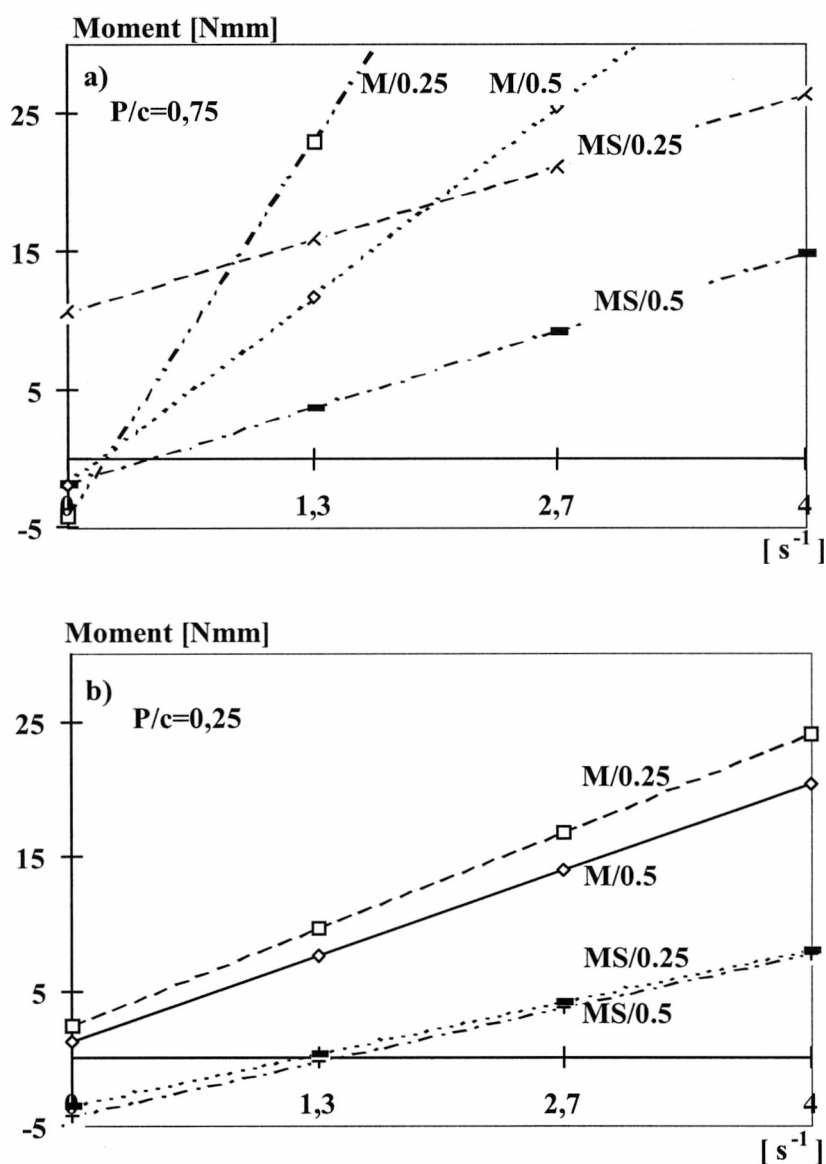
Wpływ mikrowypełnienia w postaci popiołu lotnego na właściwości reologiczne zaczynu i zaprawy przedstawiono na rys.4.2. Z krzywych płynięcia wynika (rys.4.2.a), że zastąpienie w matrycach części cementu popiołem (A - 10, 20, 30% objętości cementu, składy tab.3.5), w układzie z pyłem krzemionkowym, zwiększa międzyziarnowe tarcie (parametr h), przy czym wzrost ten zależy od zawartości popiołu, rys.4.2.a. Niewielki wpływ popiołu na granicę płynięcia zapraw, przy jednoczesnym zwiększeniu kohezji (parametr h), zmniejsza podatność na segregację składników i poprawia stabilność mieszanek w czasie.



Rys.4.2 Krzywe płynięcia a) zaprawy i b) zaczynu, modyfikowanych popiołem (A)

4.1.2 Wpływ zawartości i uziarnienia piasku

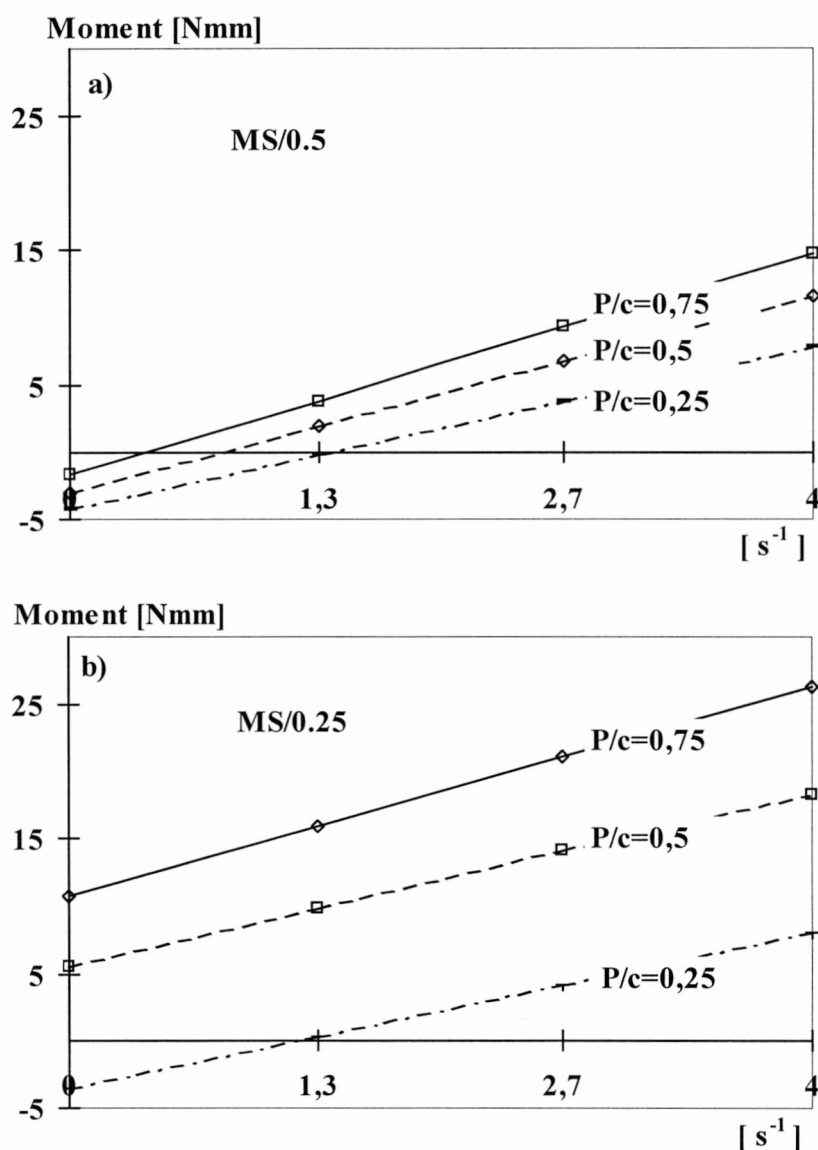
Wpływ zawartości i uziarnieniu piasku na krzywe płynięcia mieszanek typu zapraw (M i MS) bez i z pyłem krzemionkowym, przedstawia rys 4.3 i rys. 4.4 (składy tab.3.3).



Rys.4.3 Krzywe płynięcia zapraw bez i z pyłem krzemionkowym (S), przy stałej zawartości piasku ($<0,25$ mm, $<0,5$ mm): a) $P/c=0,75$; b) $P/c=0,25$

Jak wynika z rys.4.3.a zmniejszenie wielkości ziaren piasku z $<0,5$ do $<0,25$ mm, przy zachowaniu stałego stosunku ($P/c=0,75$), wyraźnie zwiększa granicę płynięcia w układzie z pyłem (S) i praktycznie nie wpływa na ten parametr przy jego braku. Wpływ wielkości ziaren piasku na lepkość jest niewielki w układzie z pyłem, natomiast bez jego udziału zmniejszenie

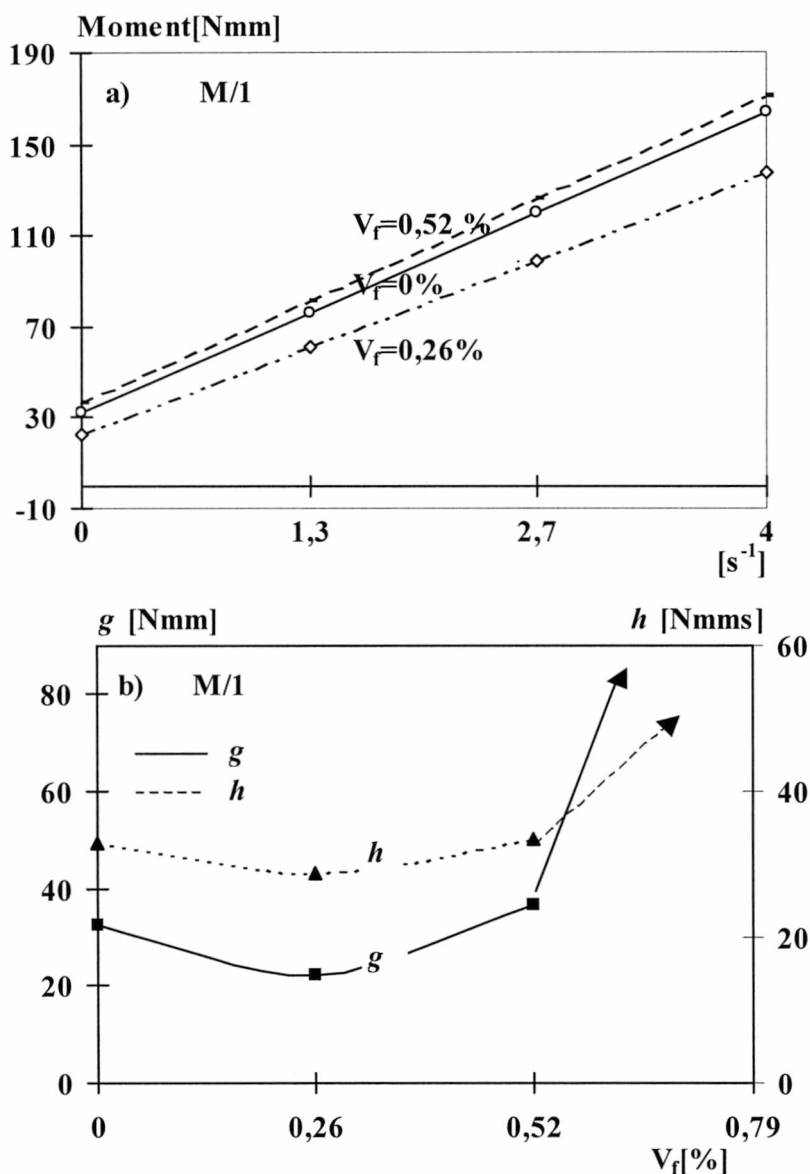
uziarnienia wyraźnie zwiększa lepkość (h), rośnie międzyziarnowe tarcie. Zmniejszenie zawartości piasku (P/c z 0,5 do 0,25mm) zdecydowanie zmniejsza jego wpływ na granicę płynięcia, natomiast jego wzrost (przy ziarnach $<0,5$ i $<0,25$ mm) wpływa głównie na zwiększenie granicy płynięcia przy nieznacznym zwiększeniu lepkości plastycznej (rys.4.4.a,b).



Rys. 4.4 Krzywe płynięcia zapraw bez i z pyłem krzemionkowym (S), przy różnej zawartości piasku P/c : a) $<0,5$ mm, b) $<0,25$ mm

4.1.3 Wpływ zawartości włókien

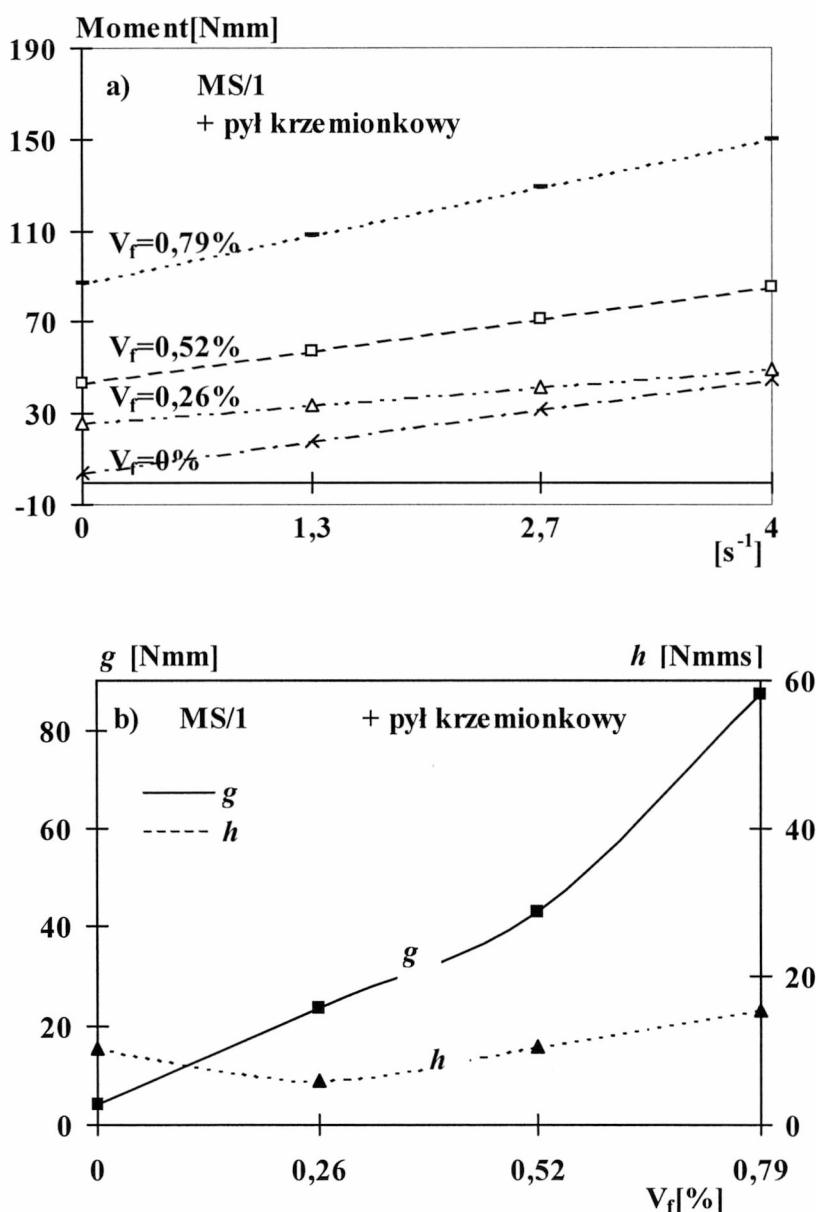
Wpływ zawartości włókien ($0-3\%V_f$) na właściwości reologiczne zapraw z największą zawartością piasku ($P/c=1,5$) oraz największym uziarnieniem $<1\text{mm}$ (M/1 i MS/1, składy tab.3.4), przedstawiono na rys.4.5 i rys.4.6. Wyznaczono krzywe płynięcia dla $V_f=0$; 0,26 i 0,52%. Przy większej zawartości uzbrojenia, spadek urabialności uniemożliwił wykonanie pomiarów przy użyciu wiskozymetru typu "Viskomat PC".



Rys.4.5 Wpływ zawartości włókien na: a) krzywe płynięcia, b) parametry g i h , zapraw bez pyłu krzemionkowego, piasek $< 1\text{mm}$

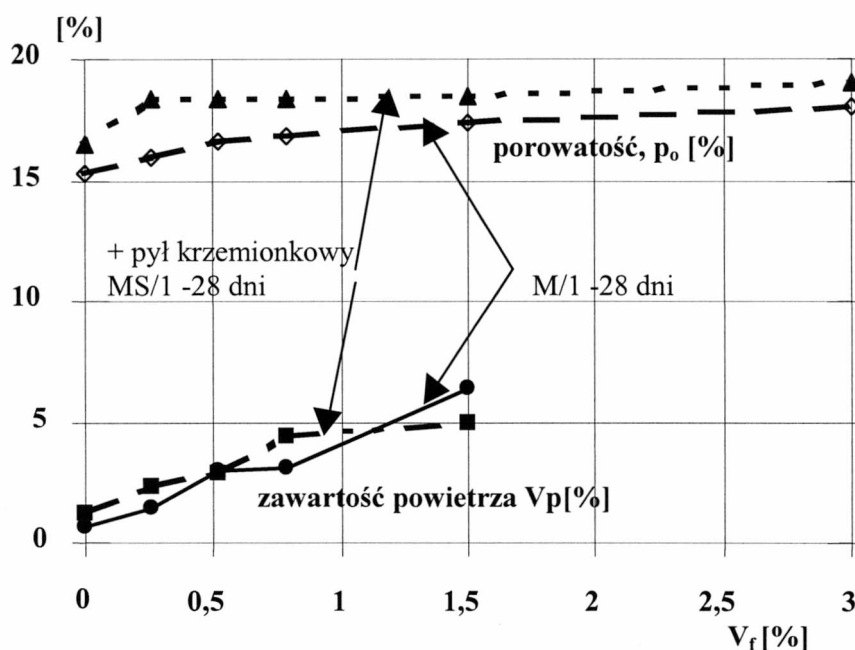
Jak wynika z rys.4.5.a,b pył krzemionkowy korzystnie wpływa na krzywe płynięcia zapraw z włóknami, zmniejsza się granica płynięcia (g) i lepkość mieszanki (h), natomiast włókna powodują znaczny wzrost głównie granicy płynięcia.

Z rysunku 4.5 wynika, że dla zapraw bez pyłu krzemionkowego (M) możliwość pomiaru kończy się przy zawartości $V_f=0,52\%$, a z pyłem (MS) przy $0,79\%V_f$, rys.4.6. Dodanie niewielkiej ilości włókien $0,26\%$ do mieszanki bez mikrowypełnienia (M i $MV_f0.26$) poprawia właściwości reologiczne. Podwojenie V_f zwiększa oba parametry g i h do wartości zbliżonych do wyjściowej zaprawy (por. M z $MV_f0.52$). Dodanie $V_f=0,26\%$ do matrycy z pyłem krzemionkowym (MS), podobnie jak do składu bez pyłu, zmniejsza parametr h , powyżej tej zawartości w przybliżeniu liniowo zwiększa. Wpływ włókien na parametr g jest dużo większy. Liniowy wzrost parametru g występuje do zawartości około $0,52\%V_f$, powyżej wyraźnie ulega przyspieszeniu.



Rys.4.6 Wpływ zawartości włókien na: a) krzywe płynięcia, b) parametry g i h , zapraw z pyłem krzemionkowym, piasek $< 1\text{mm}$

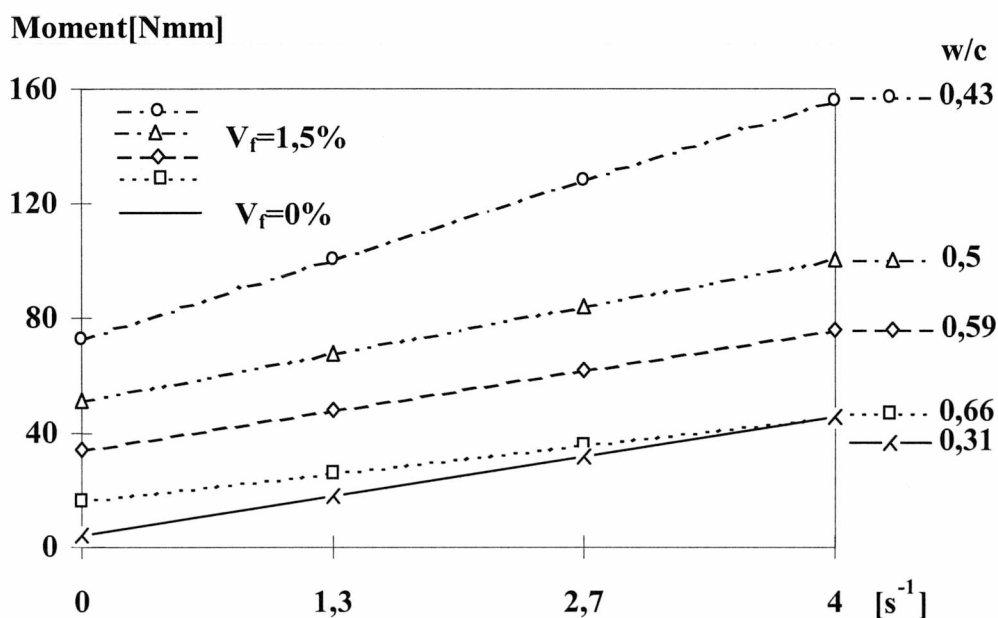
Wystąpienie minimum dla parametru h przy $0,26\%V_f$ w obu typach zapraw (rys.4.5 i rys.4.6) podobnie jak dla parametru g w zaprawie bez pyłu wskazuje, że przy małej zawartości włókien, nie do pominięcia jest wpływ napowietrzenia (V_p). Wskazują na to wyniki z oznaczeń gęstości mieszanki i porowatości kompozytów po 28 dniach twardnienia, rys.4.7. Zawartość powietrza w mieszance zwiększają hydrofobowe włókna, natomiast pył krzemionkowy stabilizuje dyspersję pęcherzyków. Stwierdzony znacznie większy wpływ powietrza na lepkość niż na granicę płynięcia (zgodnie z [53]) uzasadnia wystąpienie minimum dla parametru h (na krzywej $V_f - h$) i wskazuje, że przy małej zawartości włókien lepkość mieszanki zależy głównie od lepkości matrycy i wprowadzonego z włóknami powietrza. Mniejszy wpływ powietrza na granicę płynięcia od pyłu krzemionkowego (S) wyjaśnia, dlaczego w zaprawach z pyłem parametr g w całym zakresie V_f kontrolowany jest głównie włóknami.



Rys.4.7 Wpływ zawartości włókien w zaprawach z piaskiem $< 1\text{mm}$ na ilość wprowadzonego powietrza i porowatość

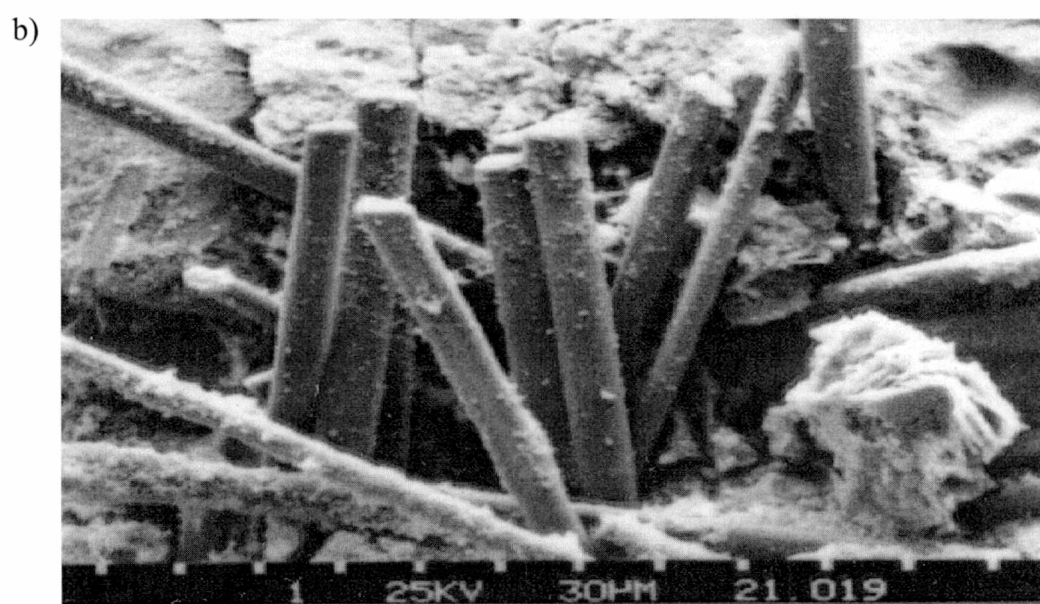
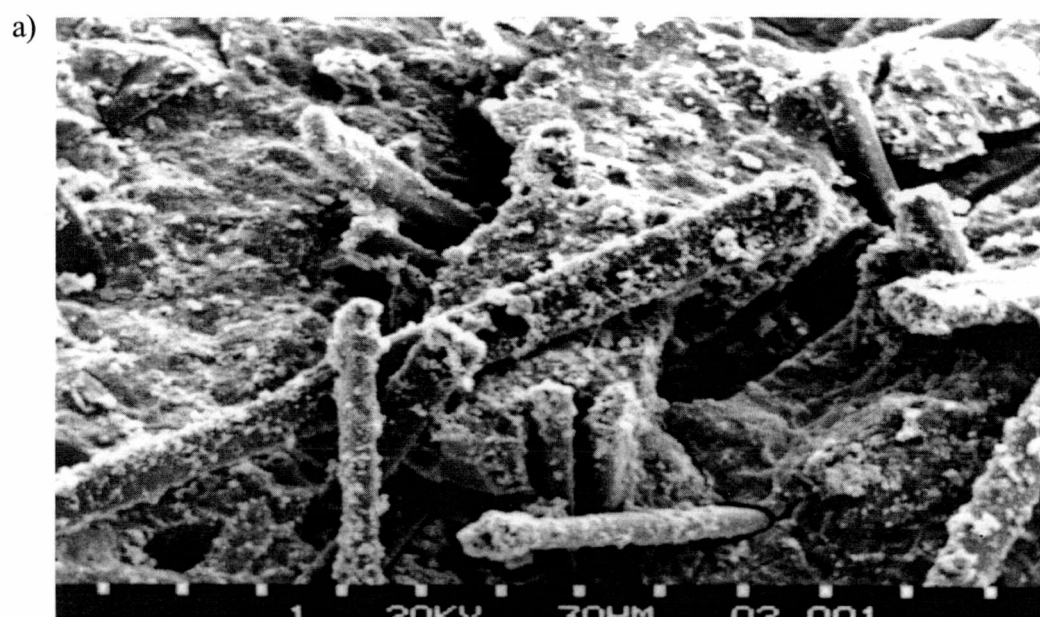
Znacznie większy wzrost oporu do odkształceń (parametru g) w zaprawach z pyłem przy $V_f > 0,59\%$, można wyjaśnić przejściem przez włókna kontroli nad właściwościami reologicznymi mieszanki, rys.4.6 i rys.4.9.

Zwiększenie oporów do przepływu dodaniem 1,5% włókien jest tak duże, że w celu doprowadzenia do porównywalnej ciekłości z mieszanką bez uzbrojenia, trzeba zwiększyć w/c z 0,31 do 0,66, rys.4.8. Zwiększenie odległości między włóknami dodaniem wody zmniejsza współdziałanie włókien (zmniejszenie parametru g).



Rys.4.8 Krzywe płynięcia mieszanek przy $V_f = 1,5\%$ i różnym w/c oraz mieszanki bez włókien

W stwierdzonym dużo większym wpływie włókien na granicę płynięcia niż na lepkość, przy większej zawartości włókien ($V_f = 3\%$, rys.4.5 i rys.4.6) znaczący udział mają również źle rozproszone włókna, które obserwowano na przełomach próbek, rys. 4.9.b.

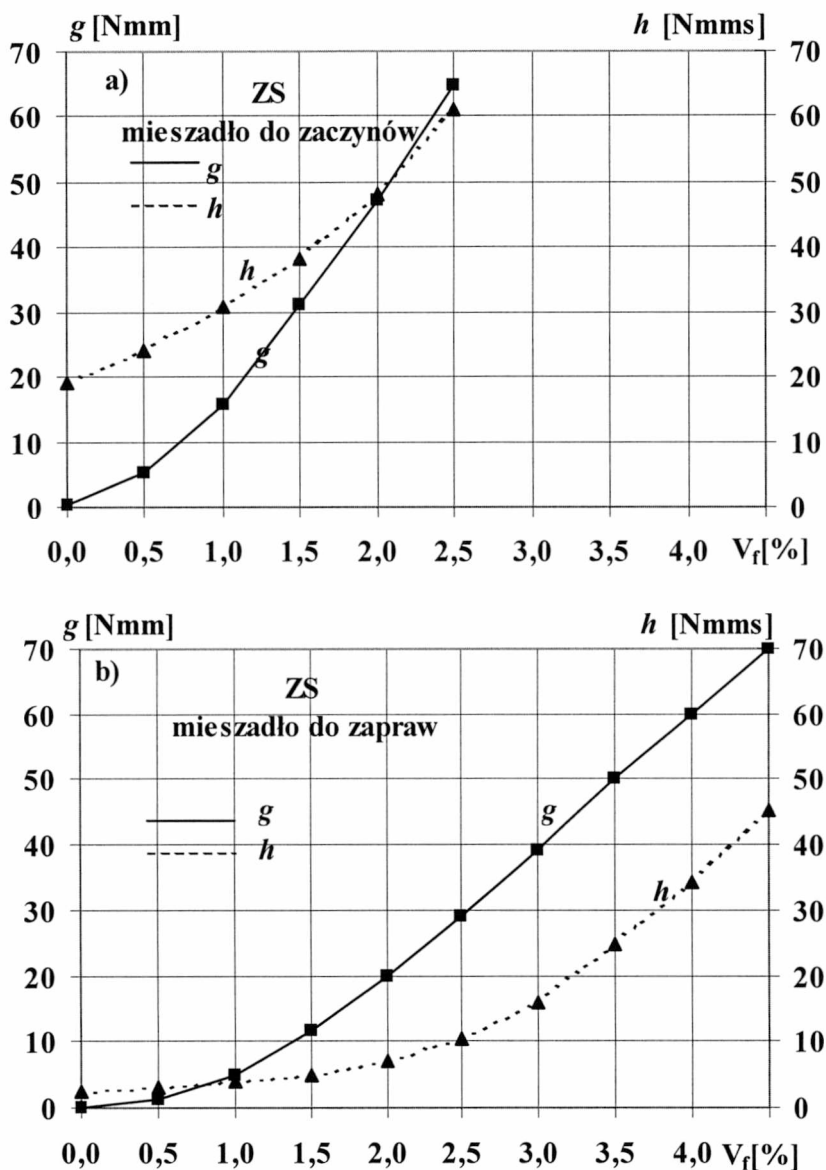


Rys.4.9 Przelomy po próbie zginania kompozytów z : a) prawidłowo, $V_f=1,5\%$,
b) źle rozproszonymi niskomodulowymi włóknami węglowymi, $V_f=3\%$

4.1.4 Możliwa do rozproszenia ilość włókien

Wpływ kształtu mieszadła

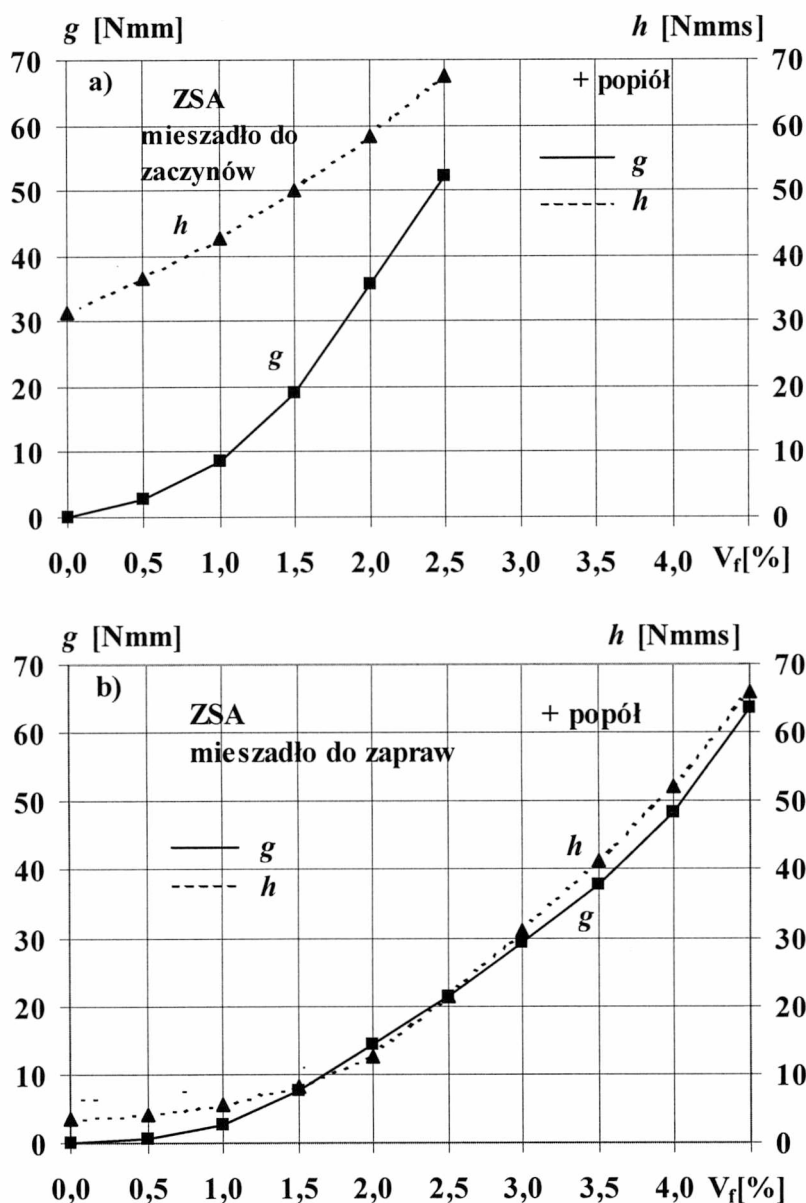
Wpływ zawartości włókien na parametry reologiczne mieszanek typu zaczynów z uwzględnieniem wpływu kształtu mieszadła przedstawia rys.4.10 i rys.4.11.



Rys.4.10 Wpływ V_f włókien na mierzone parametry reologiczne g i h zaczynów przy użyciu mieszadła do: a) zaczynów, b) zapraw

Jak wynika z rys 4.10 w matrycy typu zaczynów o $w/b=0,31$ możliwa do rozproszenia ilość włókien wyznaczona viskozymetrycznie zależy nie tylko od składu, ale i kształtu użytego mieszadła. Zastosowanie mieszadła do zaczynów kończy możliwość pomiaru przy zawartości około $V_f=2,5\%$, natomiast do zapraw przy ponad $V_f>4\%$.

Jak wynika z rysunku 4.11 podstawienie 30% cementu popiołem nieznacznie zmniejsza granicę płynięcia, natomiast zwiększa lepkość, co ogranicza segregację składników. Korzystny wpływ zawartości popiołu na rozproszenie włókien (umożliwia wprowadzenie większej ilości włókien) można wyjaśnić obecnością śladowych ilości węgla w popiele, który ułatwia ich rozproszenie [21].

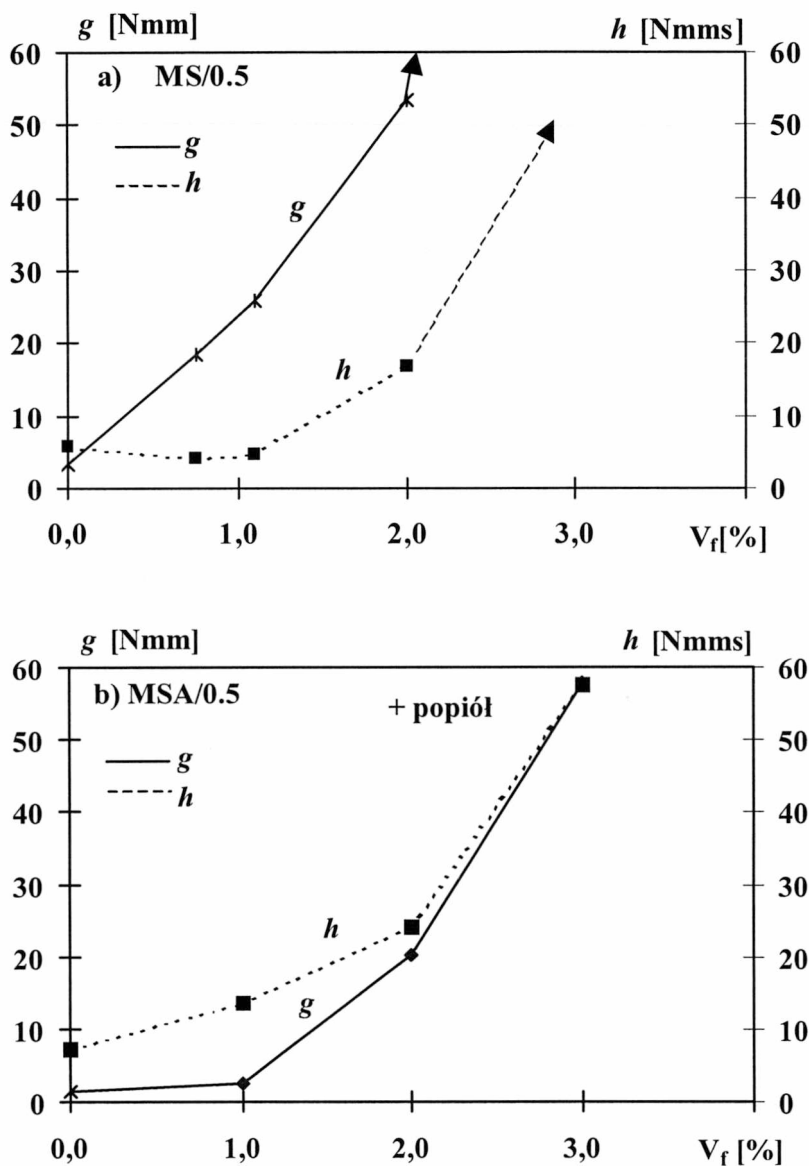


Rys.4.11 Wpływ V_f włókien na mierzone parametry reologiczne g i h zaczynów z popiołem przy użyciu mieszadła do: a) zaczynów, b) zapraw

Z rysunku 4.10 i 4.11 wynika, że w badaniach reologicznych zaczyny z włóknami należy traktować jak zaprawy. Modyfikacja składu matrycy popiołem nie zmienia słuszności tego wniosku.

Maksymalna możliwa do rozproszenia ilość włókien

Na rysunku 4.12 przedstawiono zależność parametrów g i h zapraw od $V_f=0-3,0\%$ z uwzględnieniem wpływu popiołu lotnego, piasek $< 0,5\text{mm}$ (składy tab.3.5).



Rys.4.12 Wpływ zawartości włókien na parametry reologiczne mieszanek typu zapraw, piasek $< 0,5\text{ mm}$: a) bez popiołu MS, b) z popiołem MSA

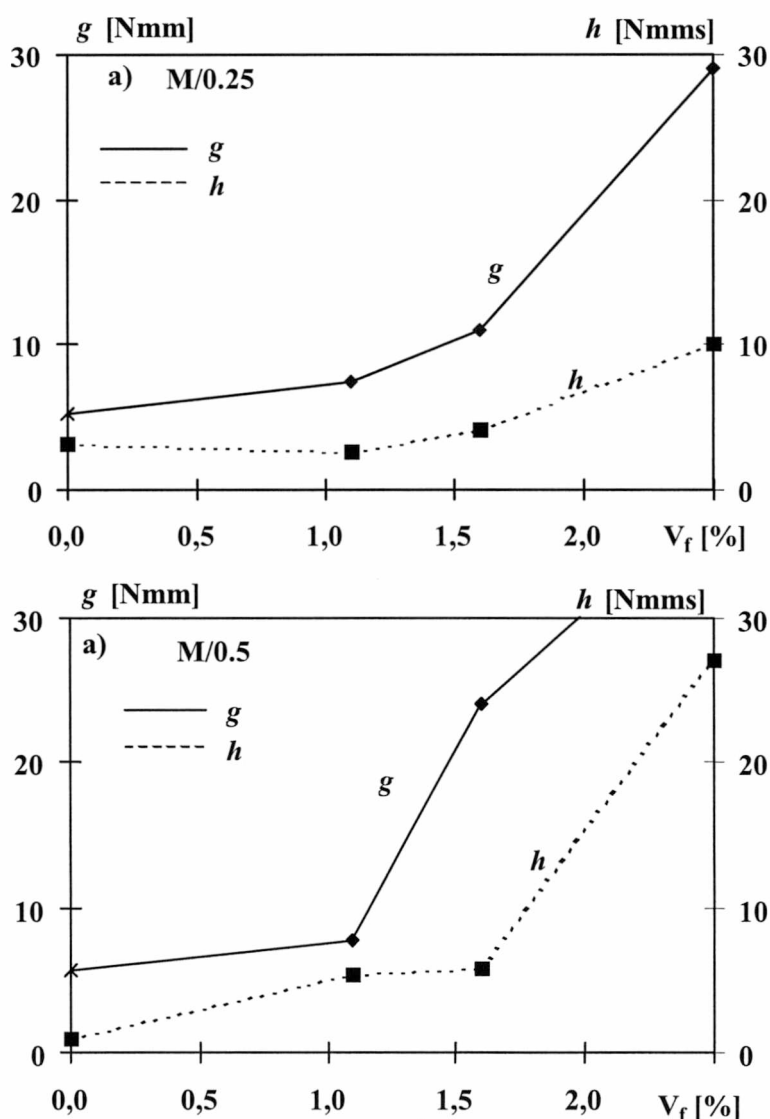
Poprawę właściwości reologicznych zapraw dodatkiem popiołu wykorzystano do zwiększenia możliwej do rozproszenia ilości włókien w mieszankach.

Jak wynika z rys.4.12 do matrycy bez popiołu wprowadzono około $2\%V_f$ włókien, natomiast z dodatkiem popiołu do $3,0\%V_f$. Można przyjąć, że przy takiej samej zawartości włókien $2,5\%V_f$ w kompozytach zawierających popiół jednorodność rozproszenia włókien

będzie większa. Otrzymane rezultaty wskazują, że górna możliwa do prawidłowego rozproszenia ilość włókien w badanych matrycach, nie powinna przekraczać 2,5 % V_f .

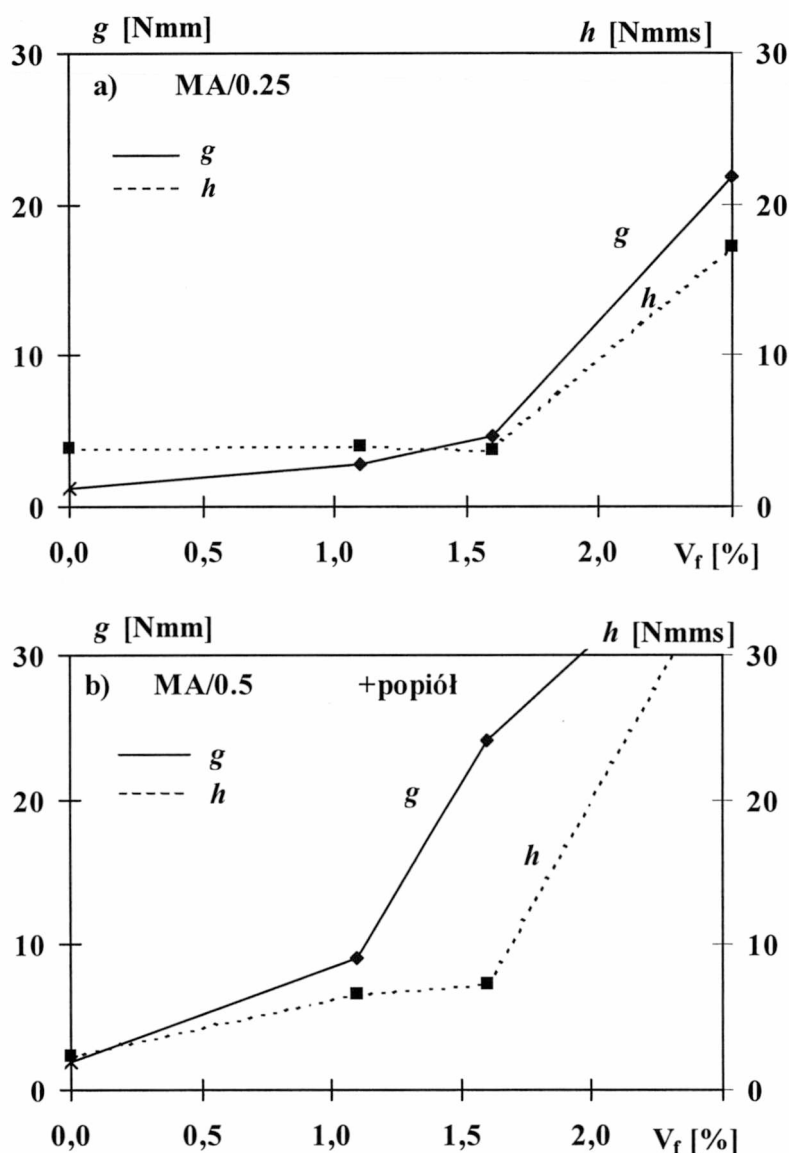
Przedstawione na rys.4.13 i rys.4.14 wyniki pomiarów parametrów reologicznych zapraw w funkcji $V_f=0-2,5\%$ z uwzględnieniem wpływu popiołu i uziarnienia piasku, jednoznacznie wskazują na nieliniową zależność urabialności od zawartości włókien, niezależnie od składu matrycy. Przegięcie na krzywych przy zawartości włókien około 1,5% wskazuje na zmianę czynnika kontrolującego parametry reologiczne zapraw.

Gwałtowny wzrost obu parametrów g i h przy zawartości włókien powyżej 1,1% V_f w zaprawach o zawartości fazy stałej $\phi_{st}=0,6$ (ułamek objętościowy fazy stałej) można wyjaśnić wystąpieniem współdziałania włókien. Przy mniejszej zawartości uzbrojenia przepływ kontroluje reologia matrycy, przy większej - włókna.



Rys.4.13 Wpływ zawartości włókien na parametry reologiczne zaprawy:
a) piasek <0,25mm, b) piasek <0,5 mm

Obliczona średnia odległość między włóknami (tab.4.2) po przekroczeniu $V_f=1,6\%$, jest większa od średnicy największego ziarna piasku równej 0,25 mm (250 μ m). Nawiązując do badań [28], nieliniowy wzrost g i h może być wyjaśniony wzajemnym oddziaływaniem włókien oraz włókna - ziarna piasku, przy czym rolę piasku należy traktować drugoplanowo.

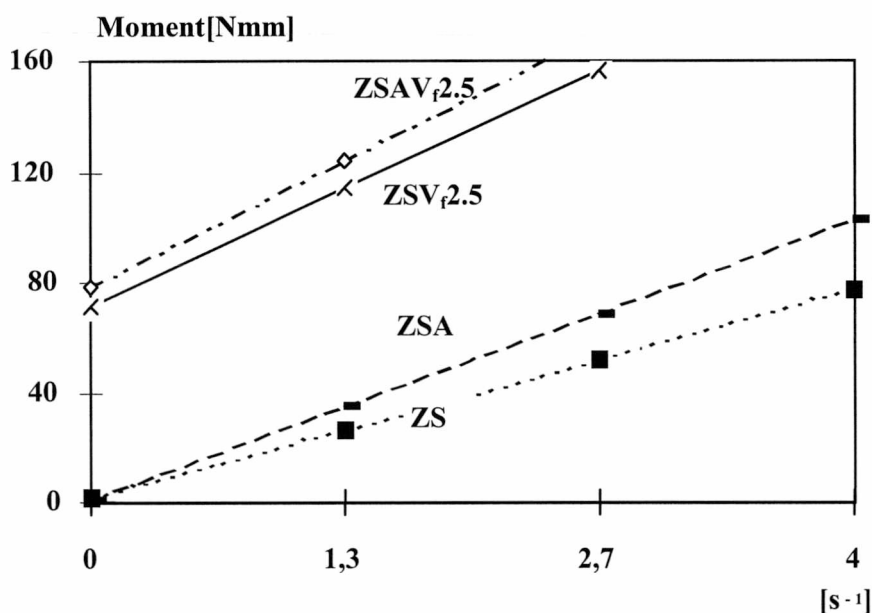


Rys.4.14 Wpływ zawartości włókien na parametry reologiczne zaprawy z dodatkiem popiołu:
a) piasek <0,25mm, b) piasek <0,5 mm

Tablica 4.2 Obliczone średnie odległości między włóknami (d_F) w kompozytach typu zaprawa bez (M) i z popiołem (MA)

	M				MA			
V_f %	0	1,1	1,6	2,5	0	1,1	1,6	2,5
d_F [μ m]	-	710	488	312	-	816	510	326

Na rysunku 4.15 pokazano wpływ możliwej do rozproszenia ilości włókien $V_f=2,5\%$ na krzywe płynięcia mieszanek typu zaczynów bez i z popiołem. Jak wynika z rysunku 4.15 włókna niezależnie od składu matrycy powodują znaczący wzrost granicy płynięcia, przy niewielkim oddziaływaniu na lepkość mieszanki.



Rys.4.15 Krzywe płynięcia mieszanek typu zaczynów modyfikowanych popiołem bez i ze stałą zawartością włókien, $V_f=2,5\%$

Podsumowanie

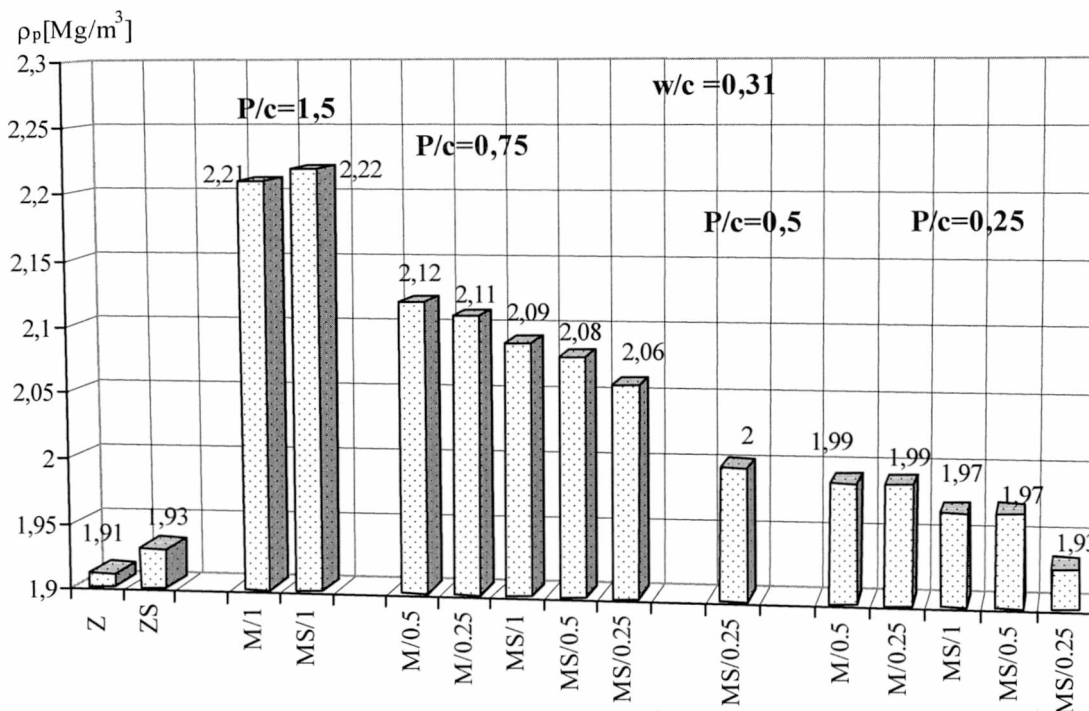
Z przeprowadzonych badań właściwości reologicznych kompozytów wynika, że:

- dodanie pyłu krzemionkowego oraz podstawienie 30% cementu popiołem poprawia urabialność mieszanki i umożliwia wprowadzenie większej ilości włókien,
- zwiększenie zawartości i wielkości ziaren piasku pogarsza parametry reologiczne ograniczając maksymalną możliwą do wprowadzenia ilość uzbrojenia,
- maksymalna możliwa do rozproszenia w zaczynach ilość włókien, zależy od geometrii mieszadła, dlatego przy wiskozymetrycznym dobieraniu ilości włókien, zaczyn należy traktować jak zaprawę,
- zależność parametrów reologicznych g i h od zawartości włókien nie jest liniowa, a przegięcie na krzywej $g-V_f$ informuje o zmianie mechanizmu kontrolującego przepływ. Do przegięcia na krzywej V_f-g przepływ kontroluje głównie matryca, powyżej - współdziałanie między włóknami, a w zaprawie dodatkowo między włóknami i ziarnami piasku,
- ilość włókien odpowiadająca przegięciu na krzywej zmienia się wraz z modyfikacją składu matrycy, co pozwala na optymalizowanie ich zawartości już na etapie przygotowywania mieszanek

4.2 Wpływ składu matryc i kompozytów na właściwości fizyczne i mechaniczne

4.2.1 Gęstość, porowatość, nasiąkliwość

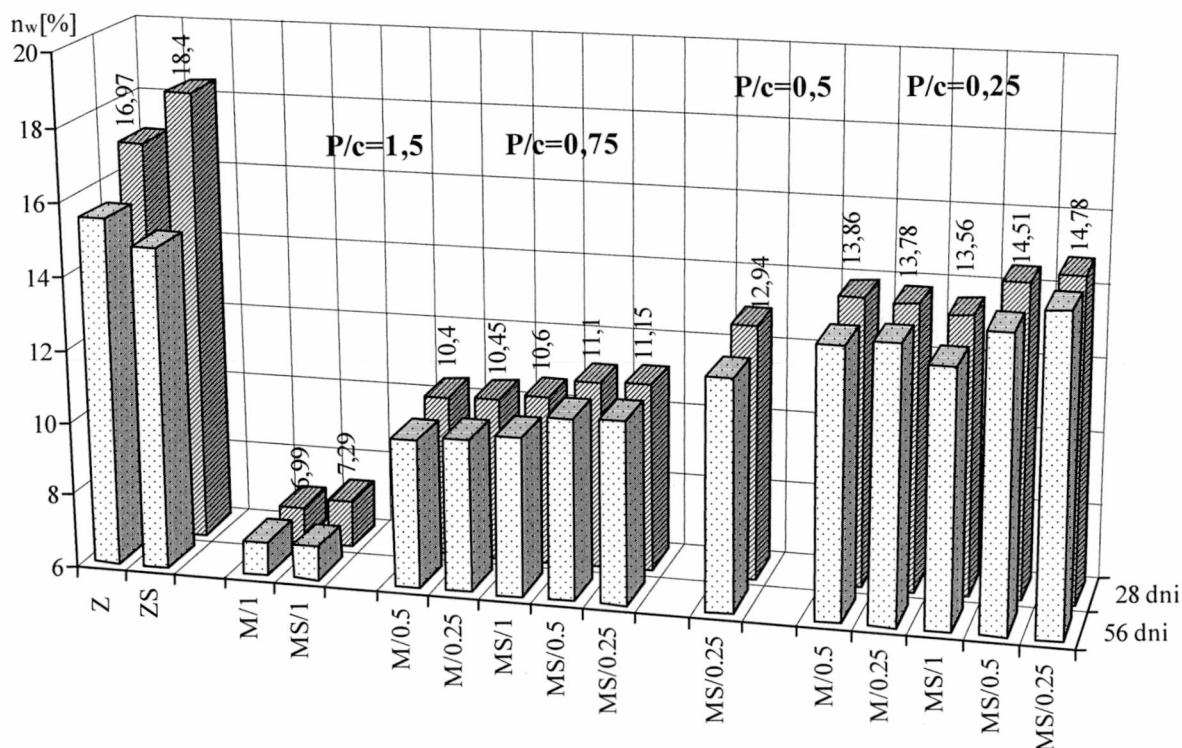
Wpływ zawartości i uziarnienia piasku na: gęstość (ρ_p) przedstawia rys. 4.16, nasiąkliwość (n_w) rys. 4.17 i porowatość (p_o) rys. 4.18. Wpływ włókien na ρ_p , n_w , p_o przedstawiają rysunki 4.19 i 4.20. Na rys. 4.21 porównano gęstość, porowatość i nasiąkliwość matryc i kompozytów ze stałą zawartością włókien $V_f=2,5\%$.



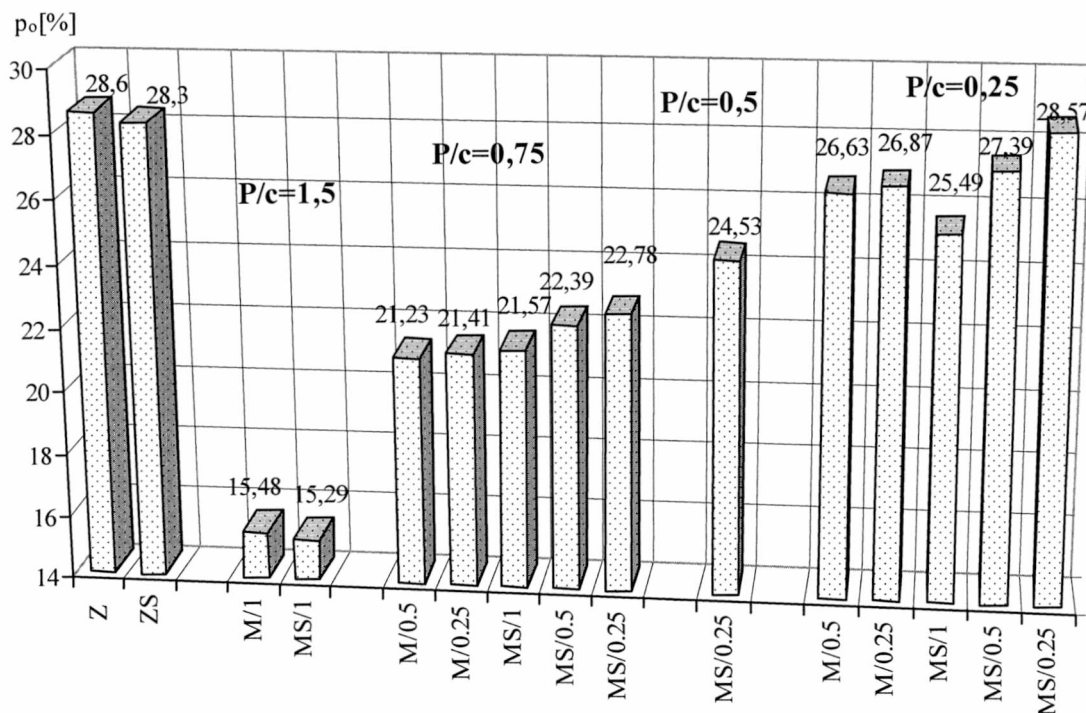
Rys.4.16 Wpływ zawartości i wielkości ziaren piasku na gęstość (ρ_p) matryc

Jak wynika z rysunku 4.16 gęstość (ρ_p) zaczynów i zapraw bez włókien (składy tab.3.3) zmniejsza się wraz z ograniczeniem zawartości piasku (P/c), ponieważ ma on największą gęstość (2,65 Mg/m³) w porównaniu do produktów uwodnienia cementu (~2,20Mg/m³) w stwardniałej matrycy. Wpływ pyłu krzemionkowego na gęstość zwiększa się ze zmniejszeniem wielkości ziaren piasku.

Mniejsza gęstość (ρ_p) próbek z pyłem krzemionkowym (S) wynika z większej zawartości powietrza wprowadzonego do mieszanki z tą domieszką. Potwierdzają to wyniki pomiarów porowatości (p_o) i nasiąkliwości (n_w), które są większe dla próbek z dodatkiem pyłu i rosną wraz ze zmniejszeniem zawartości i wielkości ziaren piasku, rys.4.17-18. Przyrost w czasie produktów hydratacji w matrycach zawierających pył krzemionkowy zmniejsza p_o i n_w , zwiększając wytrzymałość na ściskanie f_c (rozdział 4.2.2).



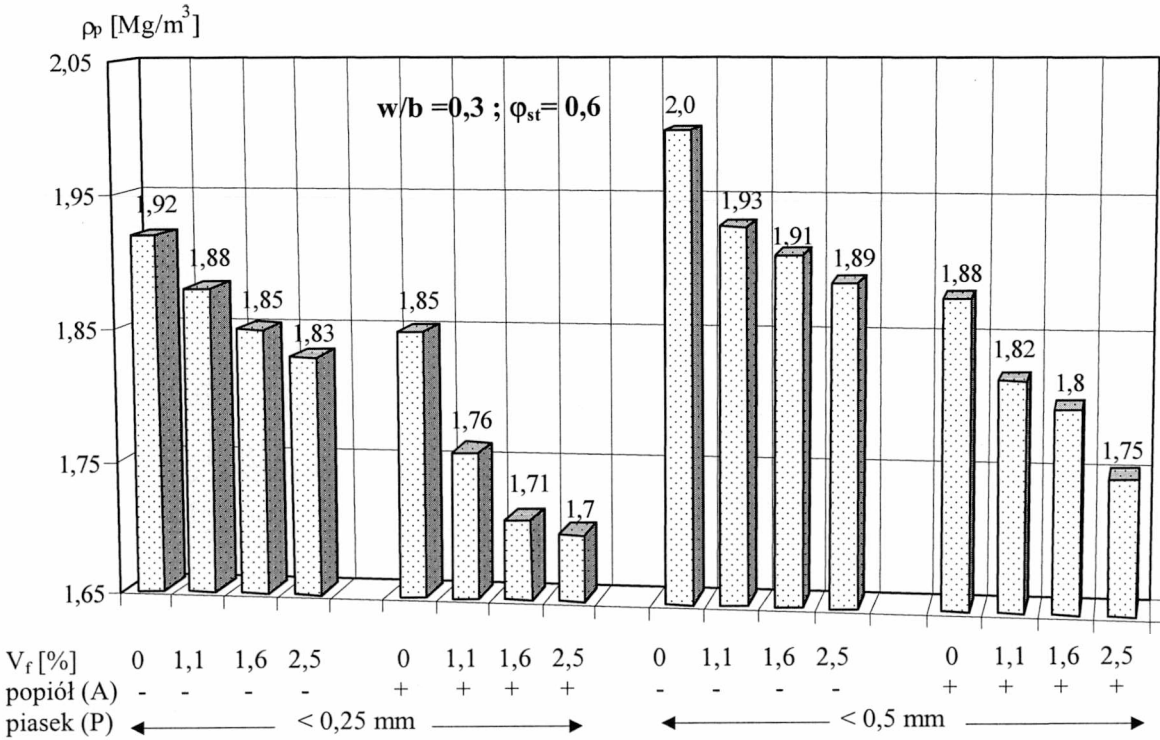
Rys.4.17 Wpływ zawartości i wielkości ziaren piasku na nasiąkliwość (n_w) matryc



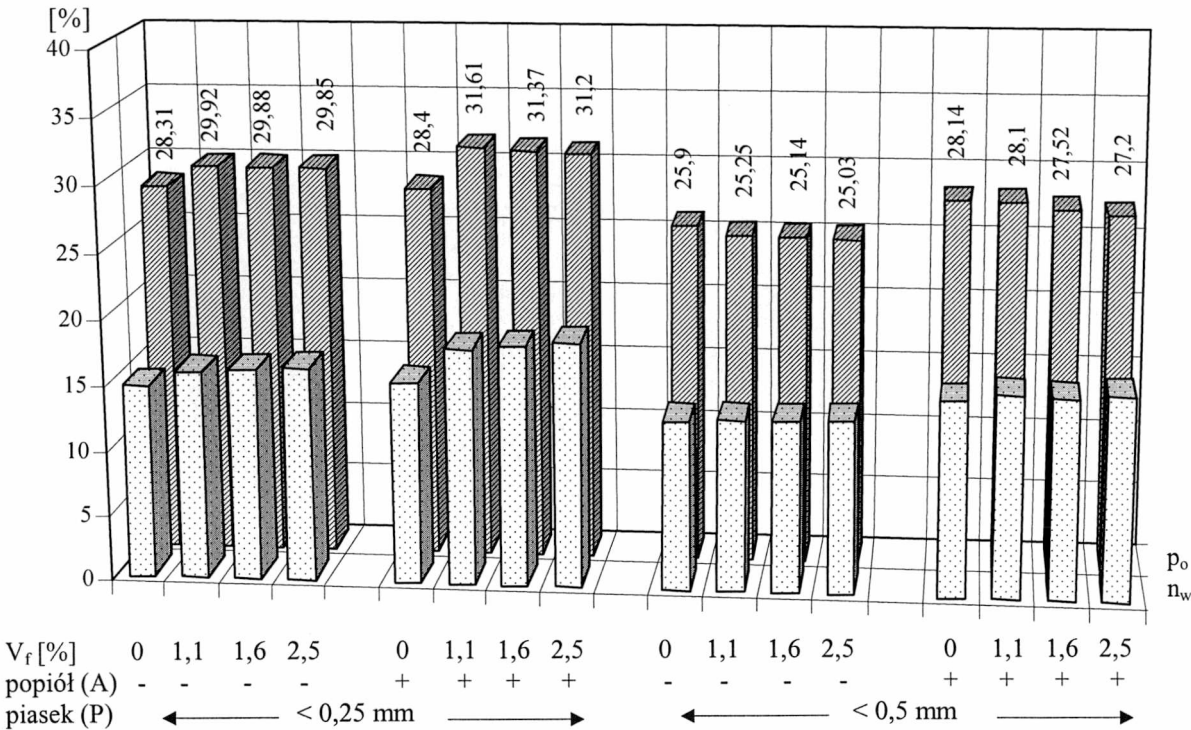
Rys.4.18 Wpływ zawartości i wielkości ziaren piasku na porowatość (p_o) matryc

Jak wynika z rysunku 4.19 gęstość (ρ_p) zapraw z włóknami (składy tab.3.6) zmniejsza się wraz ze wzrostem ich zawartości, wynika to ze zwiększenia zawartości powietrza hydrofobowymi włóknami (rys.4.7, [63]).

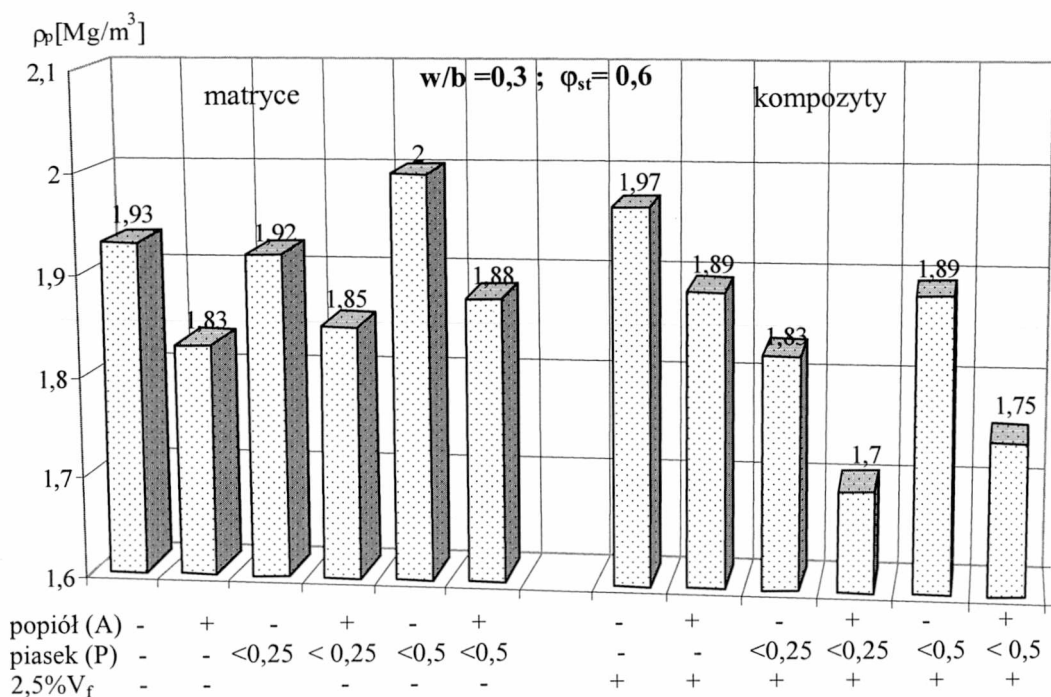
Dodatek popiołu obniża gęstość (ρ_p) oraz zwiększa porowatość i nasiąkliwość (p_o , n_w), spowodowane jest to porowatością ziaren popiołu rys.4.19 i 4.20.



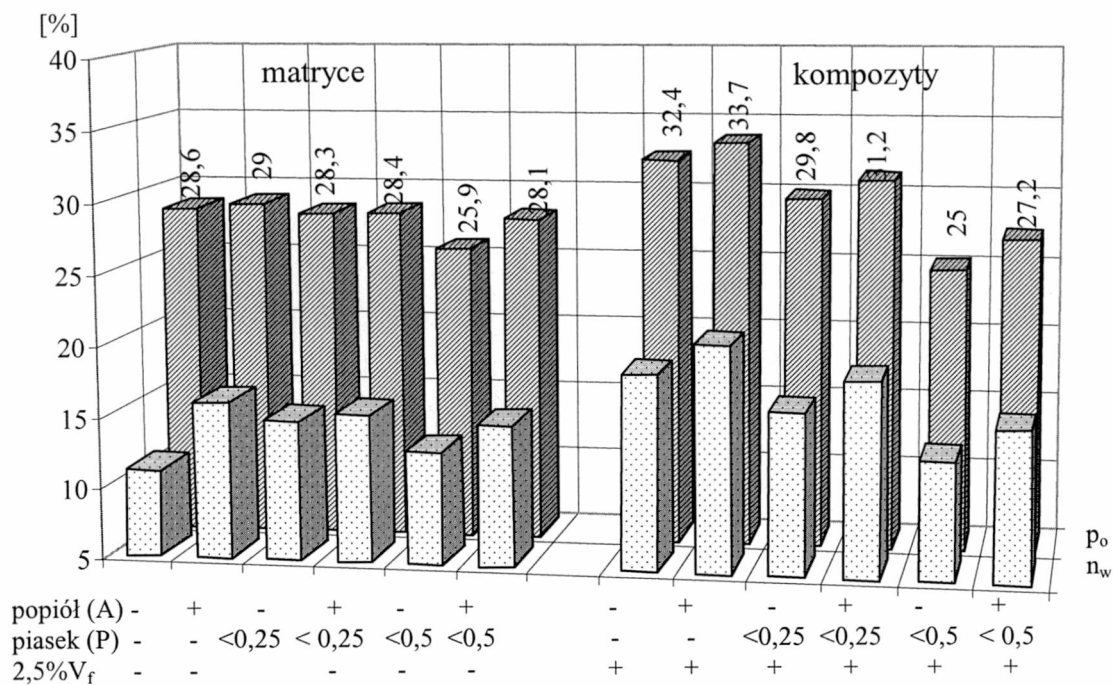
Rys.4.19 Wpływ włókien $V_f=0-2,5\%$ na gęstość (ρ_p) kompozytów bez (MS) i z dodatkiem popiołu (MSA), piasek $<0,25$; $<0,5$ mm



Rys.4.20 Wpływ włókien $V_f=0-2,5\%$ na porowatość (p_o) i nasiąkliwość (n_w) kompozytów bez i z dodatkiem popiołu (MS i MSA), piasek $<0,25$; $<0,5$ mm



Rys.4.21 Gęstość (ρ_p) matryc i odpowiadających im kompozytów, $V_f=2,5\%$



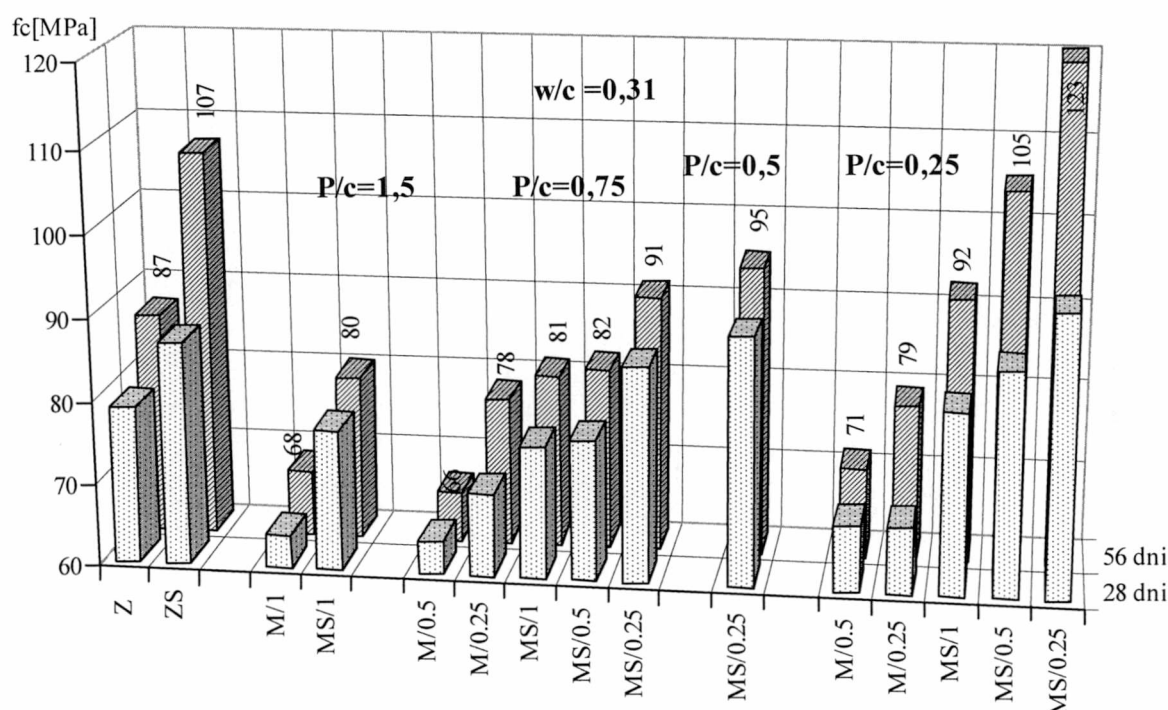
Rys.4.22 Nasiąkliwość (n_w) i porowatość (p_o) matryc i odpowiadających im kompozytów, $V_f=2,5\%$

Z zestawienia wyników pomiarów gęstości (ρ_p), nasiąkliwości (n_w) i porowatości (p_o) matryc i kompozytów podanego na rys.4.21 i 4.22 wynika, że przy stałej zawartości włókien, największy wpływ na zmniejszenie gęstości ma popiół lotny, uzasadnia to względnie jego duża zawartość (30% masy cementu).

4.2.2 Wytrzymałość na ściskanie i zginanie

Wytrzymałość na ściskanie

Wpływ pyłu krzemionkowego (S) oraz zawartości i uziarnienia piasku na wytrzymałość na ściskanie (f_c) matryc przedstawia rys.4.23 (składy tab.3.3). Wpływ włókien ($V_f=0-2,5\%$) na f_c kompozytów typu zapraw bez i z popiołem pokazuje rysunek 4.24. Na rys. 4.25 porównano wytrzymałości f_c matryc i kompozytów o zawartości włókien $V_f=2,5\%$.

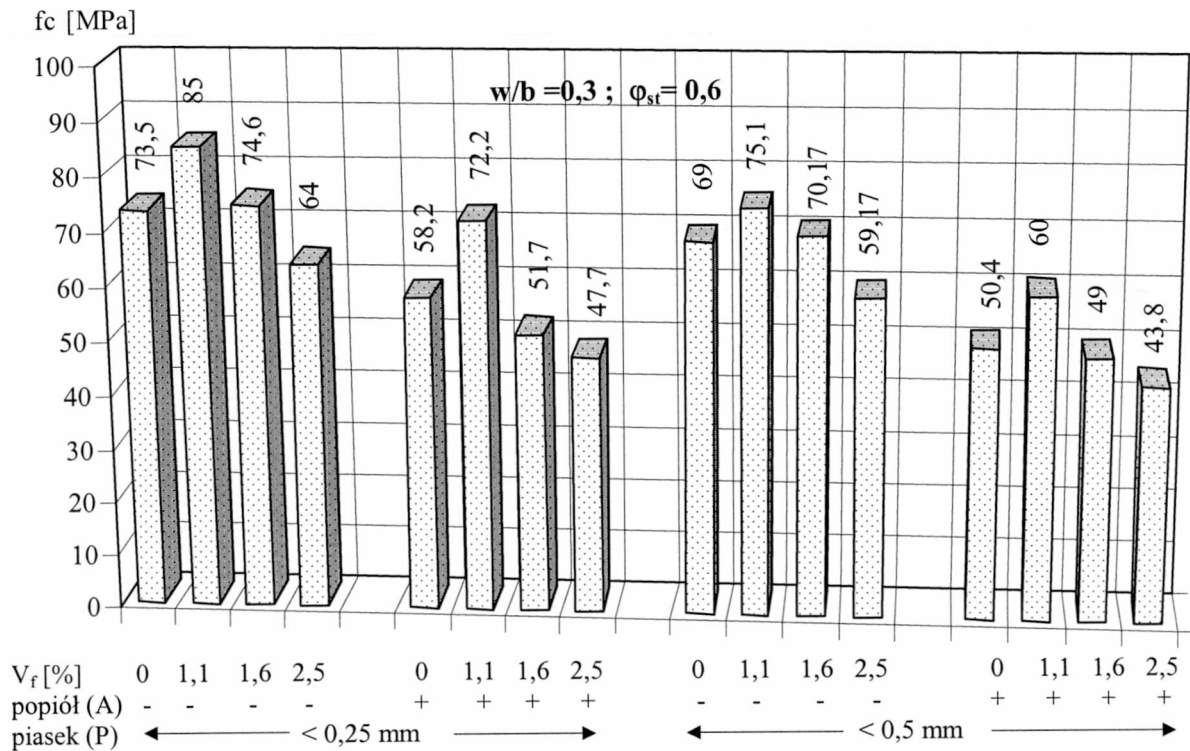


Rys.4.23 Wpływ zawartości i wielkości ziaren piasku na f_c matryc bez i z pyłem krzemionkowym (S) po 28 i 56 dniach twardnienia

Jak wynika z rys.4.23 wytrzymałość na ściskanie maleje ze wzrostem zawartości piasku, natomiast przy stałym P/c , f_c zwiększa się wraz ze zmniejszeniem ziaren piasku. Większe wartości wytrzymałości (f_c) zapraw z drobniejszym ziarnem piasku (MS/0.5 i MS/0.25) i z niewielką jego zawartością $P/c=0.25$, od zaczynów ZS, można wyjaśnić ograniczeniem przez piasek niekorzystnego wpływu naprężeń skurczowych na wytrzymałość. Największe wartości f_c wykazały próbki z pyłem krzemionkowym po 56 dniach twardnienia.

Stwierdzone znaczne różnice w wytrzymałości f_c po 28 i 56 dniach wskazują, że wyznaczanie niezbędnej zawartości włókien metodą analityczną nie może opierać się na f_{c-28} .

W kompozytach typu zapraw (piasek $<0,25$ mm i $<0,5$ mm, bez i z dodatkiem popiołu, składy tab.3.6), stwierdzono przyrost wytrzymałości na ściskanie, tylko przy najmniejszej zawartości włókien $V_f=1,1\%$, rys.4.24. Zjawisko to wyjaśniono absorpcją energii na ich zrywanie.



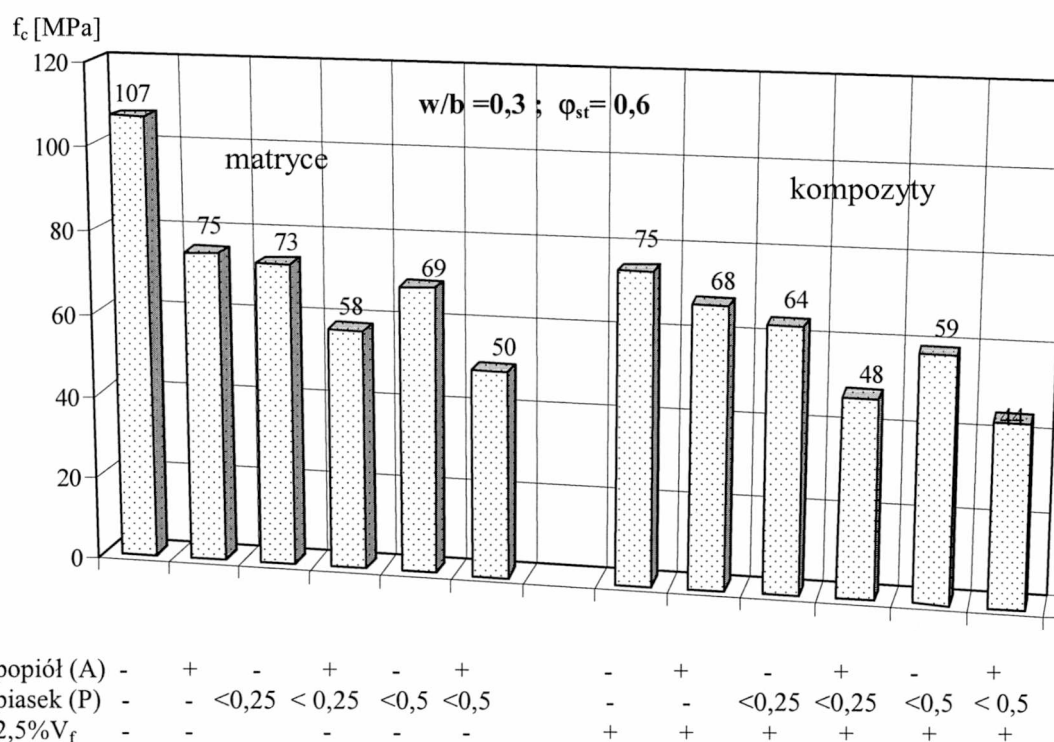
Rys.4.24 Wpływ włókien na f_c zapraw bez i z dodatkiem popiołu (MS i MSA), piasek $<0,25$ i $<0,5$ mm

Ograniczenie pękania włókien zwiększeniem ich zawartości oraz podstawieniem 30% cementu popiołem wynika z osłabienia wytrzymałości (f_c) kompozytu. Zestawione na rys.4.25 wyniki z oznaczeń f_c matrycy i kompozytów o stałej zawartości $V_f=2,5\%$ wskazują, że największe zmniejszenie f_c występuje w składach zawierających popiół i piasek o większym uziarnieniu $<0,5$ mm.

Jak wynika z rys.4.25 zawartość włókien $V_f=2,5\%$ zmniejsza f_c kompozytów, przy czym najwięcej porównawczego zaczynu. Zmniejszenie włóknami f_c zapraw nie eliminuje dodatkowego obniżenia wytrzymałości popiołem i większym uziarnieniem piasku. Ze względu na f_c badane matryce i odpowiadające im kompozyty można uszeregować:

matryce: $ZS \gg ZSA \approx MS/0.25 > MS/0.5 > MSA/0.25 > MSA/0.5$

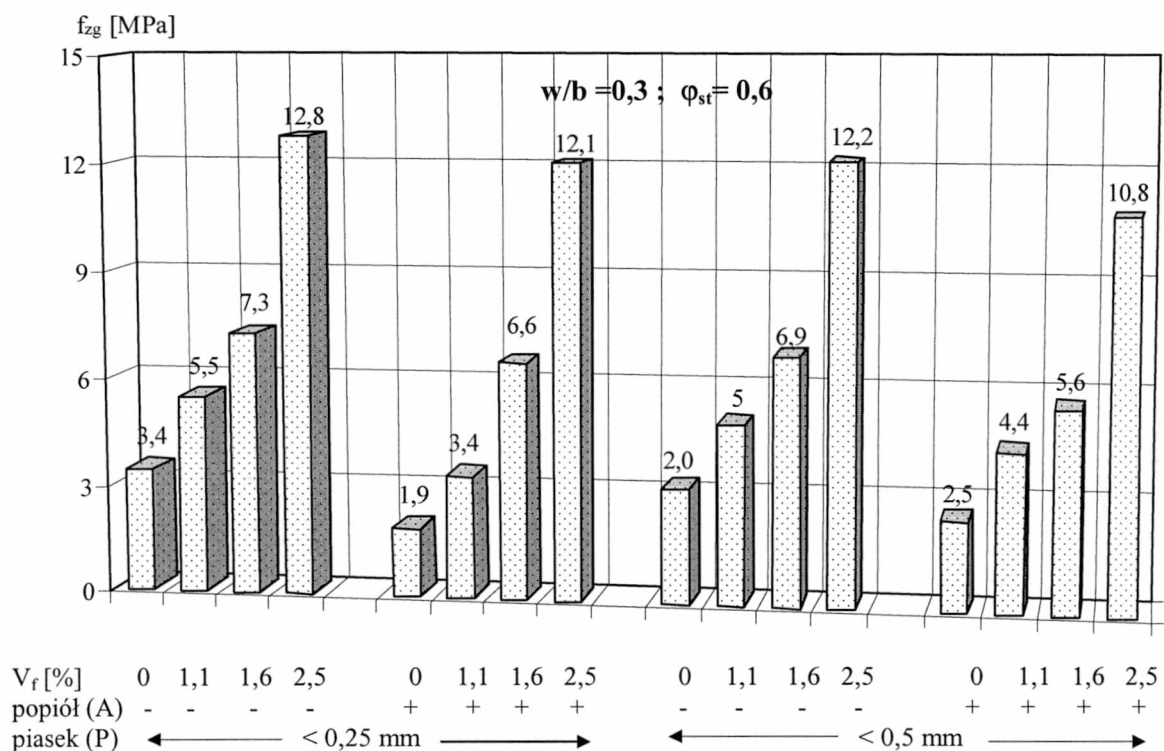
kompozyty: $ZSV_f > ZSAV_f > MSV_f/0.25 > MSV_f/0.5 > MSAV_f/0.25 > MSAV_f/0.5$



Rys.4.25 Wytrzymałość na ściskanie f_c matryc i kompozytów ($V_f=2,5\%$) typu zaczyn i zaprawa bez i z dodatkiem popiołu, piasek <0,25 i <0,5mm

Wytrzymałość na zginanie

Wyniki badań wpływu zawartości włókien $V_f=0-2,5\%$ na wytrzymałość na zginanie (f_{zg}) kompozytów typu zapraw bez (MS) i z dodatkiem popiołu (MSA) pokazano na rys.4.26 (składy tab.3.6). Porównanie wpływu składu matrycy na f_{zg} przy stałej zawartości włókien $V_f=2,5\%$, pokazano na rys. 4.27.



Rys.4.26 Wytrzymałość na zginanie f_{zg} matryc typu zaprawa bez i z dodatkiem popiołu, piasek: $<0,25$ i $<0,5$ mm, $V_f=0-2,5\%$

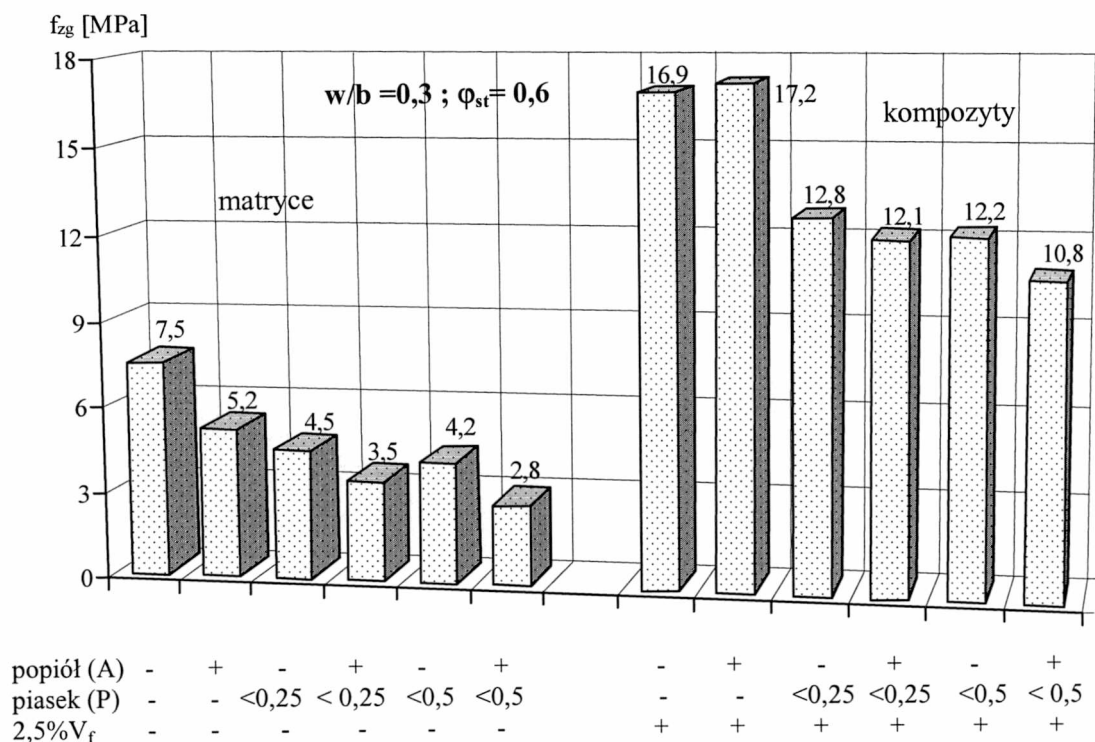
Z rysunku 4.26 wynika, że podobnie do wytrzymałości na ściskanie, zmniejszeniu uziarnienia piasku odpowiada wzrost wytrzymałości na zginanie, a osłabienie matrycy podstawieniem 30% cementu popiołem lotnym nieznacznie zmniejsza ten efekt.

Z zestawionych (rys.4.27) w stosunku do wyjściowego zaczynu ZS, wytrzymałości na zginanie f_{zg} matryc wynika, że przy stałym w/b dodanie do zaczynu ZS piasku ($<0,25$ mm) podobnie jak podstawienie 30% cementu popiołem, znacznie zmniejsza f_{zg} matrycy.

$$ZS > ZSA > MS/0.25 > MS/0.5 > MSA/0.25 > MSA/0.5$$

Przedstawione na rys.4.27 wytrzymałości f_{zg} kompozytów, potwierdzają korzystny wpływ włókien na wytrzymałość na zginanie. Największy wzrost f_{zg} wystąpił w kompozytach typu zaczynów. Ze względu na wytrzymałość na zginanie badane kompozyty można uszeregować:

$$ZSAV_f \sim ZSV_f \gg MSAV_f/0,25 \sim MSAV_f/0,5 \sim MSV_f/0,25 \sim MSV_f/0,5$$



Rys.4.27 Wytrzymałość na zginanie f_{zg} zaczynów i zapraw bez i z dodatkiem popiołu, $V_f=0$ lub 2,5%, piasek: <0,25 i <0,5mm

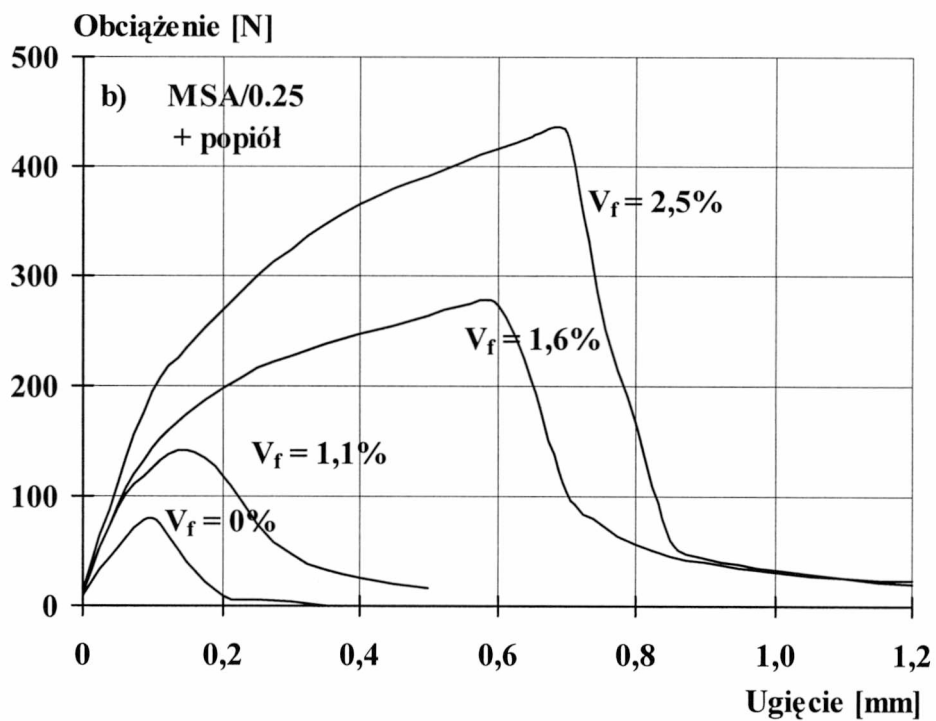
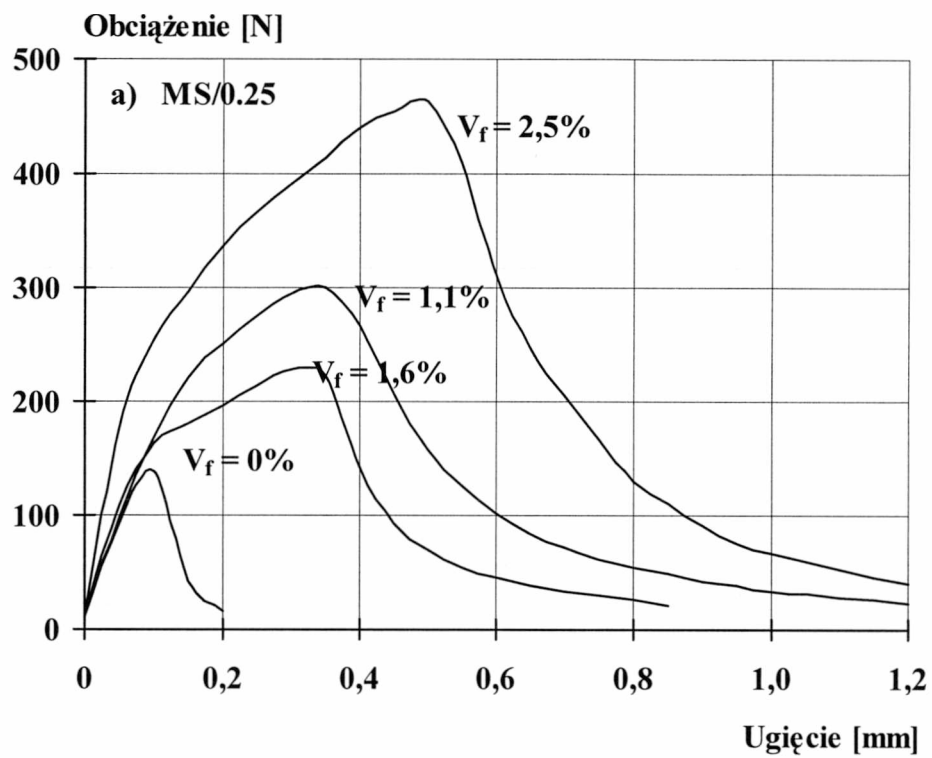
4.3 Odporność na pękanie

4.3.1. Wpływ zawartości włókien na efekt uzbrojenia

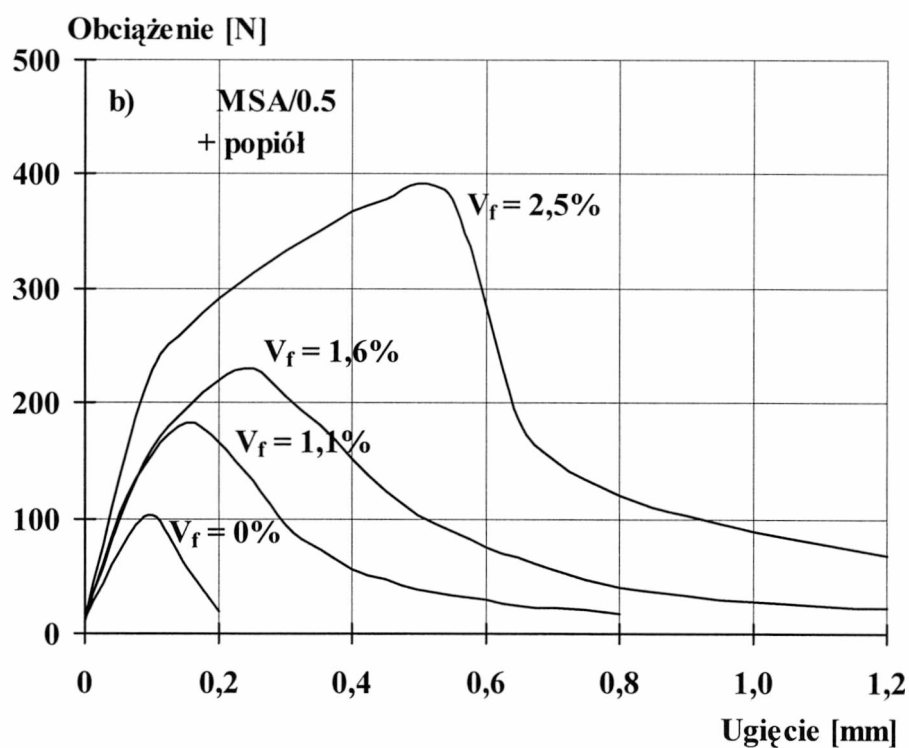
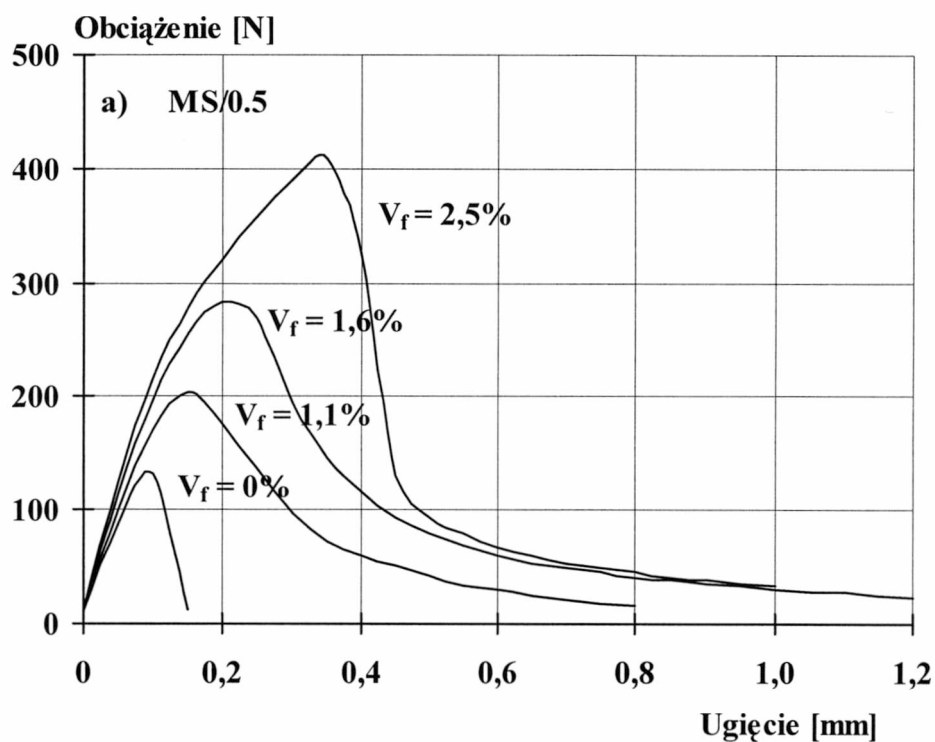
Na rysunkach 4.28 i 4.29 przedstawiono krzywe obciążenie-ugięcie matryc typu zapraw (M) z uwzględnieniem wpływu zawartości i uziarnienia piasku ($<0,5\text{mm}$ i $<0,25\text{mm}$) oraz mikrowypełnień w postaci pyłu krzemionkowego (MS) i popiołu lotnego (MA). W celu porównania wpływu składu matryc na efekt uzbrojenia na rys. 4.30 dodatkowo pokazano krzywe obciążenie-ugięcie próbek o większej zawartości piasku i uziarnieniu ($<1\text{mm}$).

Wpływ włókien na efekt uzbrojenia mierzony energią tj. powierzchnią pod krzywymi, do pierwszego zarysowania (W_{kr}), maksymalnego obciążenia (W_{max}) i całkowitą (W_{10}), przedstawia rys.4.31. Obliczone wskaźniki odporności na pękanie według ASTM I_5, I_{10}, I_{15} i zaproponowane wskaźniki wzmocnienia F_s, F_t, F_d zestawiono na rys.4.32 i rys.4.33.

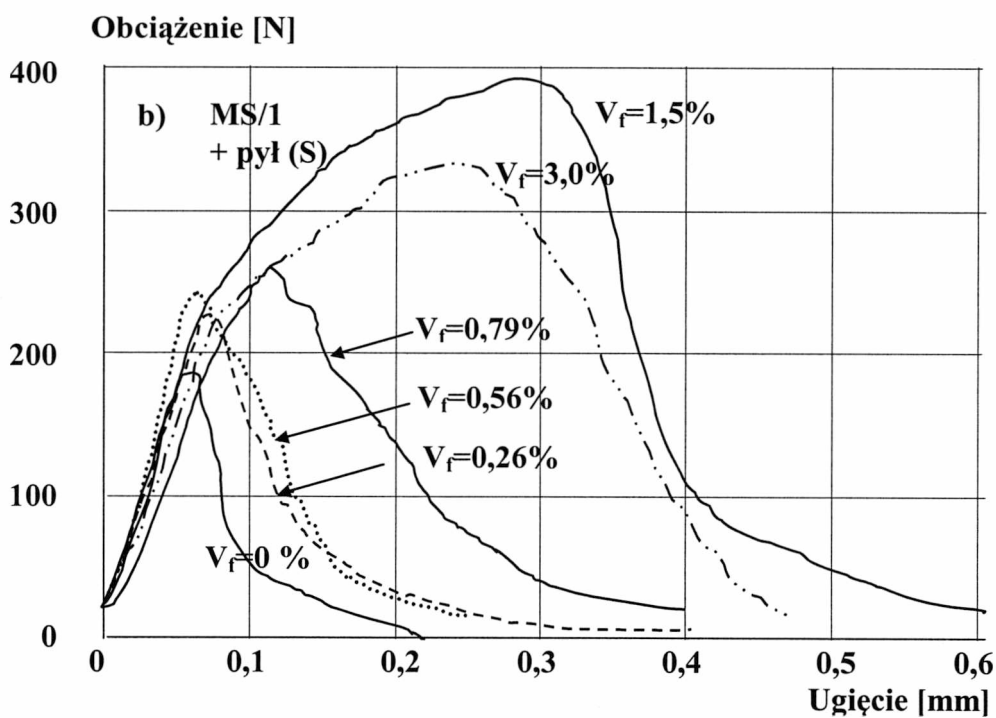
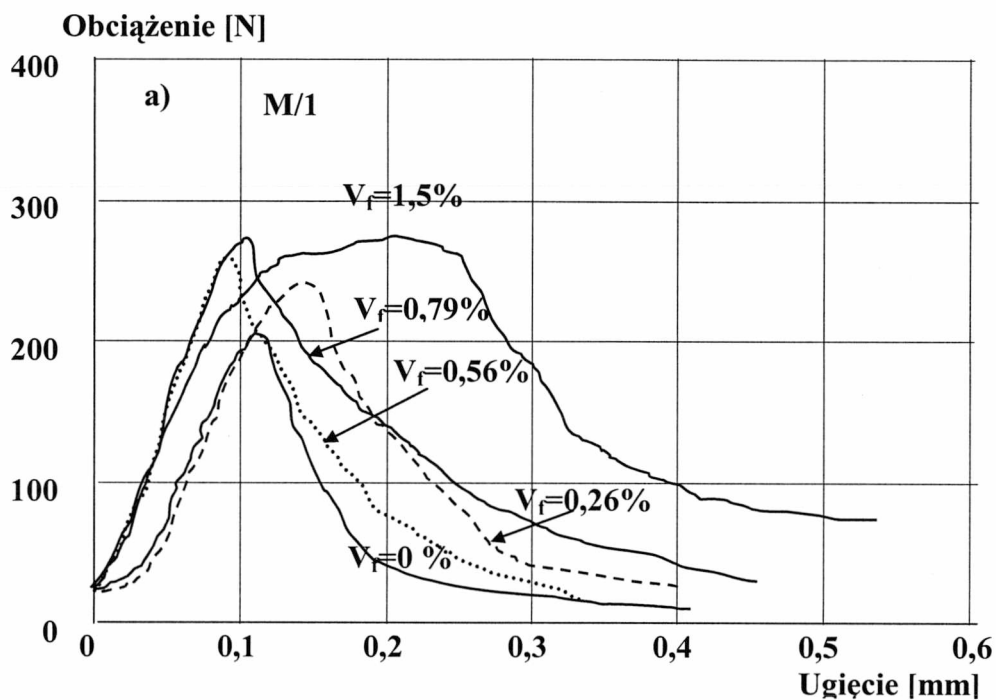
Wpływ czasu twardnienia na absorpcję energii kompozytów przedstawia rys.4.34. Stan włókien na przelomach po próbach zginania pokazuje rysunek 4.35.



Rys.4.28 Krzywe obciążenie - ugięcie, kompozytów typu zapraw, piasek <0,25 mm :
a) bez i b) z popiołem (A)



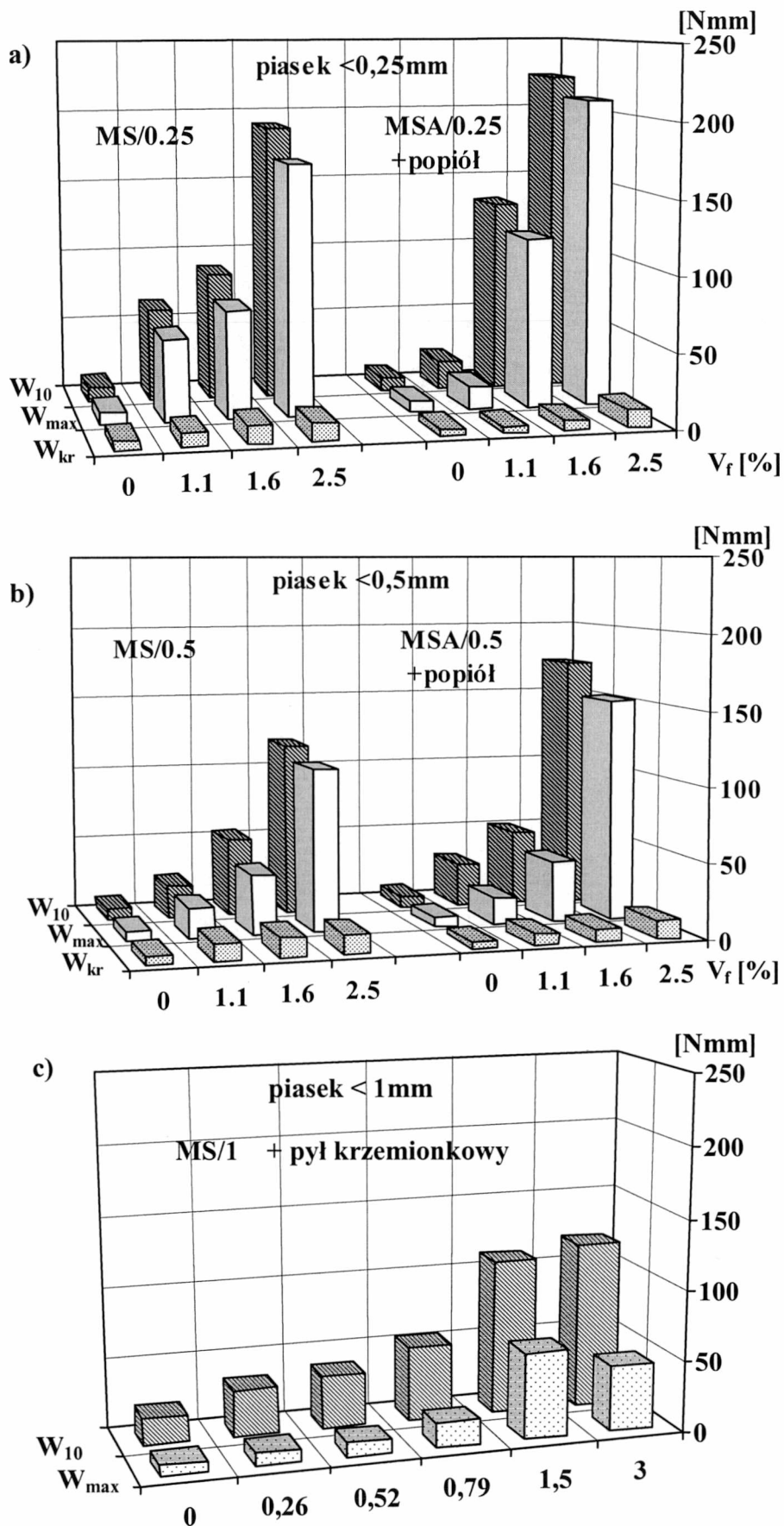
Rys.4.29 Krzywe obciążenie - ugięcie, kompozytów typu zapraw, piasek <0,5 mm :
a) bez i b) z popiołem (A)



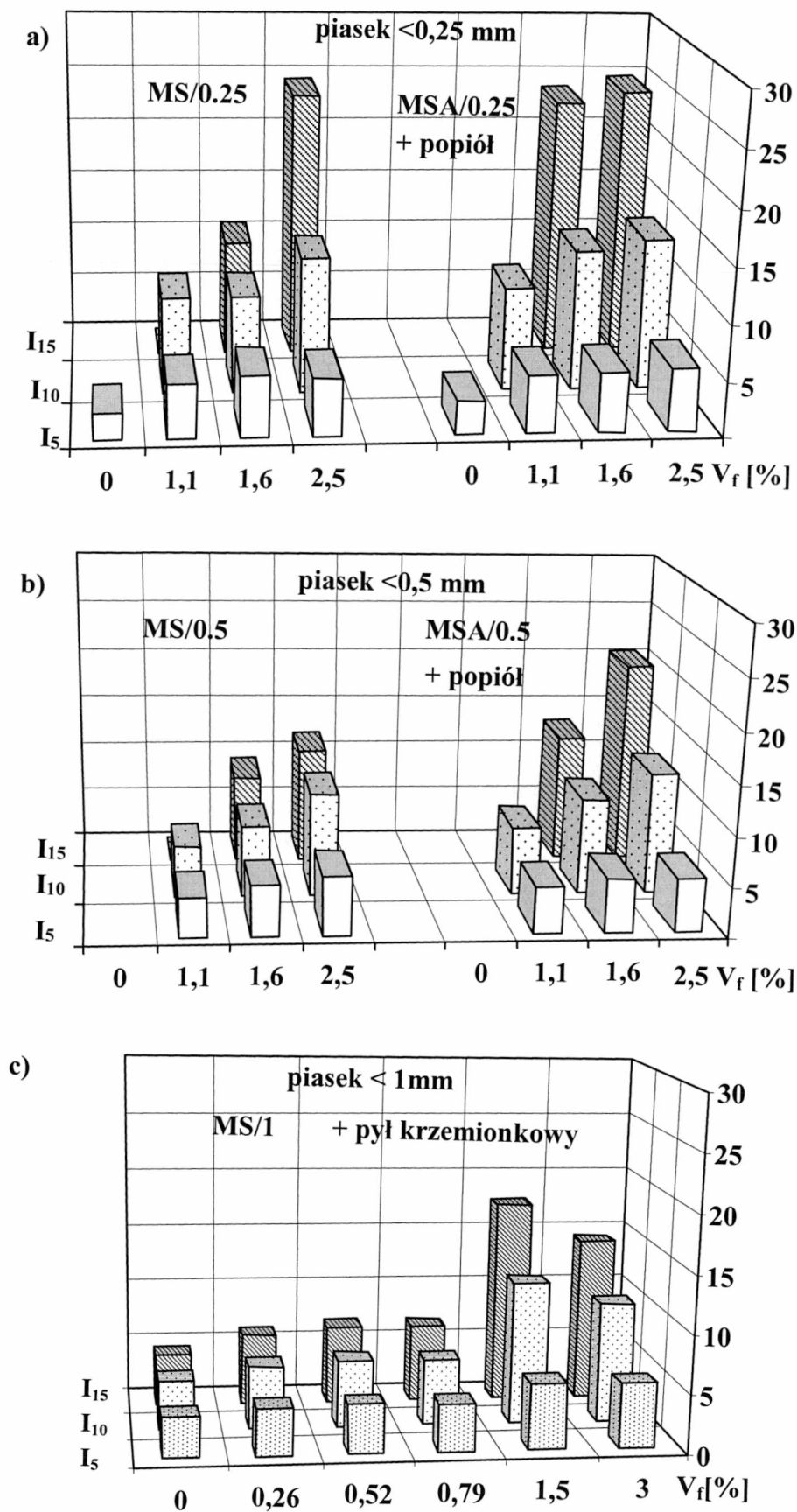
Rys. 4.30 Krzywe obciążenie-ugięcie kompozytów typu zapraw, piasek < 1mm: a) bez i b) z pyłem krzemionkowym, po 56 dniach twardnienia, [4]

Z analizy krzywych obciążenie-ugięcie wynika, że:

- niezależnie od składu matrycy zwiększenie zawartości włókien zwiększa efekt uzbrojenia (rośnie pole powierzchni pod krzywymi),
- kompozyty typu zapraw bez pyłu krzemionkowego nie wykazują odpowiednio dużego wzmocnienia mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania,
- zmniejszenie ziaren piasku zwiększa zdolność do przenoszenia obciążeń i odkształcalność kompozytu,
- podstawienie 30% cementu popiołem lotnym, przy niewielkim zmniejszeniu wytrzymałości na zginanie, wyraźnie zwiększa odkształcalność próbek mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania,
- modyfikacja kompozytów popiołem lotnym nie wpływa na kontrolę propagacji rys, co wynika z przebiegu krzywych po przekroczeniu maksymalnego obciążenia.



Rys.4.31 Wpływ włókien na energie W_{kr} , W_{max} , W_{10} , kompozytów typu zapraw modyfikowanych pyłem, popiołem, piasek: a) <0,25mm, b) <0,5 mm, c) <0,1mm



Rys.4.32 Wpływ włókien, na wskaźniki ASTM I_5 , I_{10} , I_{15} , kompozytów typu zapraw modyfikowanych pyłem, popiołem, piasek: a) <0,25mm, b) <0,5 mm c) <1mm

Ocena efektu uzbrojenia za pomocą proponowanych wskaźników: zarysowania F_s , wzmocnienia F_t i osłabienia F_d

Wyniki przeprowadzonych badań nad efektem wzmocnienia włóknami kompozytów cementowych wskazują, że można określić wpływ uzbrojenia na wszystkie trzy fazy procesu niszczenia (rys.2.1.).

Poszczególnym etapom przyporządkowano:

$$\text{I faza - wskaźnik zarysowania } F_s = \frac{W_{kr}}{W_{kr}^I}$$

$$\text{II faza - wskaźnik wzmocnienia } F_t = \frac{W_{max}}{W_{max}^I}$$

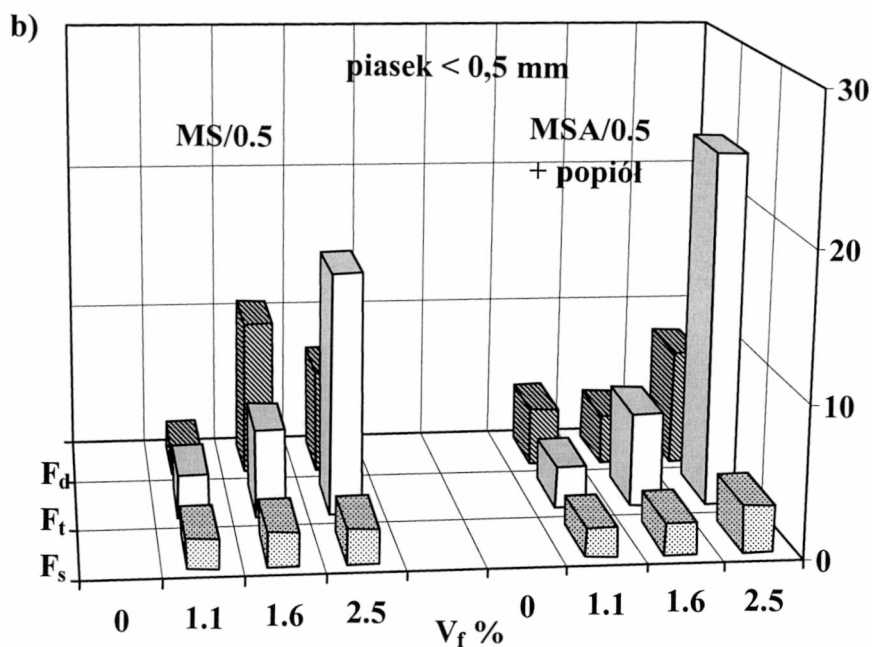
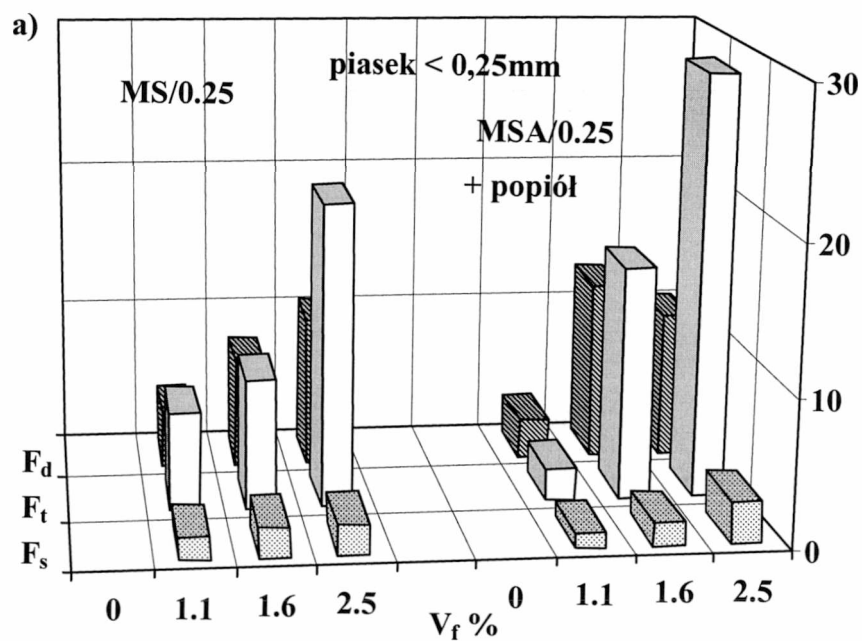
$$\text{III faza - wskaźnik osłabienia } F_d = \frac{W_{10} - W_{max}}{(W_{10} - W_{max})^I}$$

gdzie : licznik - energia absorbowana przez kompozyt
mianownik - energia absorbowana przez matrycę

Obliczone wskaźniki przedstawia rys.4.33

Zestawione na rys.4.32 i 4.33 energie: W_{kr} , W_{max} i W_{10} , oraz wskaźniki odporności na pękanie ASTM I_5, I_{10}, I_{15} i zaproponowane wskaźniki wzmocnienia F_s, F_t, F_d potwierdzają wnioski z krzywych obciążenie-ugięcie. Z analizy wartości liczbowych energii wynika, że:

- włókna zwiększają energię do pierwszego zarysowania,
- do wystąpienia wzmocnienia kompozytów mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania $W_{max} - W_{kr}$, wymagane jest dodanie nie mniej niż 1,1 % V_f ,
- podstawienie cementu popiołem osłabia wytrzymałość kompozytów i odpowiednio energię W_{kr} , przy zdecydowanym wzroście $W_{max} - W_{kr}$ (energii zwielokrotnionego zarysowania),
- wielkość i ilość piasku niewiele wpływa na W_{kr} natomiast znacznie na W_{max} i W_{10} .

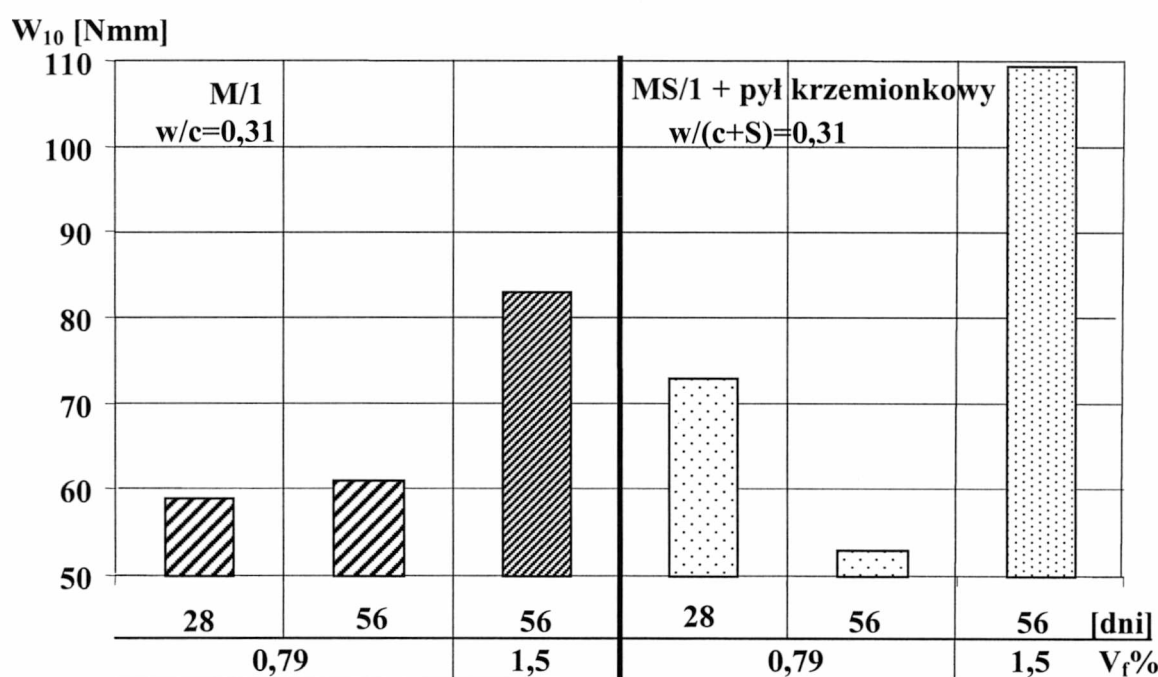


Rys.4.33 Wpływ włókien na wskaźniki F_s , F_t , F_d , kompozytów typu zapraw bez (MS) i z popiołem (MSA), piasek: a) <0,25 mm, b) <0,5mm

Wpływ czasu twardnienia na efekt uzbrojenia

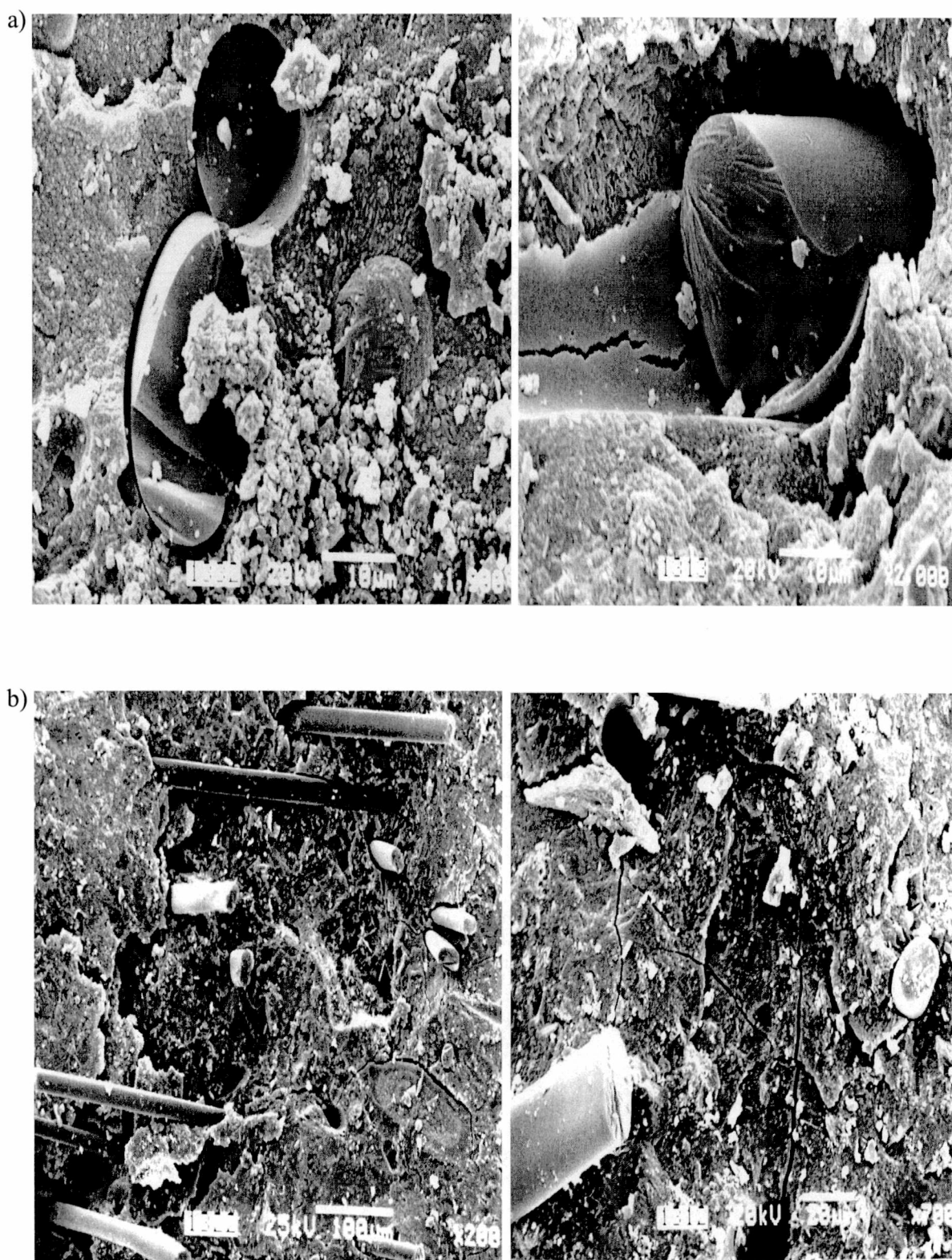
Wpływ czasu twardnienia (28 i 56 dni) na efekt uzbrojenia zapraw bez i z dodatkiem pyłu krzemionkowego przedstawiono na rys.4.34.

Z krzywych obciążenie-ugięcie wynika, że kompozyty bez pyłu krzemionkowego charakteryzują się stosunkowo małym efektem wielokrotnionego zarysowania, ze względu na słabe wiązanie matryca-włókno. Natomiast w składach z pyłem efekt uzbrojenia matrycy włóknami zmniejsza się z upływem czasu, rys. 4.34. Takie zachowanie wyjaśniono wzrostem wytrzymałości matrycy i wiązania matryca-włókno wraz z wydłużeniem czasu twardnienia z 28 do 56 dni. Powoduje to zrywanie włókien przy zbyt małej ich zawartości, zmniejszając efekt uzbrojenia (porównaj energie W_{10} po 28 i 56 dniach twardnienia.). Potwierdza to również stan włókien na przelomach po próbach zginania, rys. 4.35.a.



Rys.4.34 Całkowita energia pęknięcia W_{10} w zależności od zawartości włókien, po 28 i 56 dniach twardnienia (na podstawie [4])

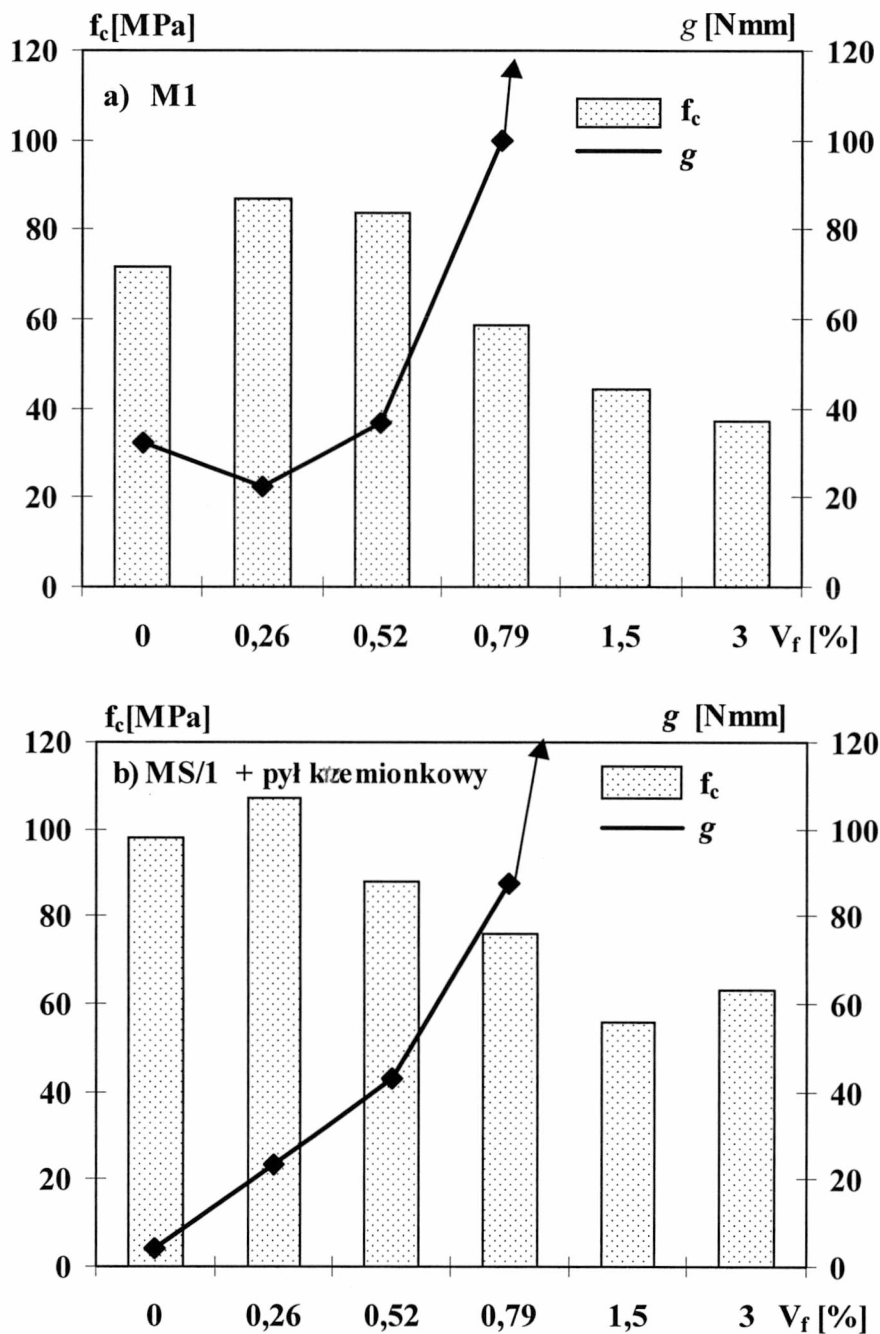
Ograniczenie wzrostu wytrzymałości matrycy w czasie podstawieniem 30% cementu mniej aktywnym popiołem lotnym, osłabiło wiązanie matryca-włókno zmniejszając pękanie włókien i znacznie zwiększając efekt uzbrojenia. Potwierdza to brak zrywanych włókien na przelomach po próbach zginania (rys.4.35.b).



Rys.4.35 Przełomy próbek po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów typu zapraw MSV_f0.79/1, uzbrojonych niskomodulowymi włóknami węglowymi, po 56 a) i 28 b) dniach twardnienia

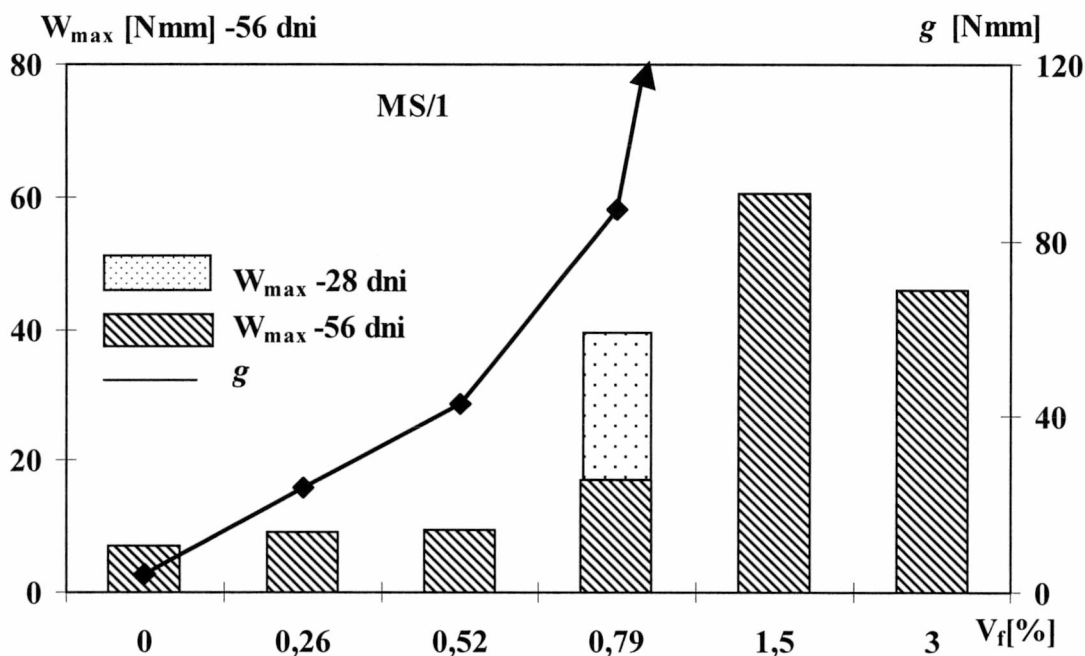
Zależność właściwości mechanicznych kompozytów od reologii mieszanek

Wpływ zawartości włókien $V_f=0-3\%$ na granicę płynięcia (g) i wytrzymałość na ściskanie (f_c) oraz całkowitą energię (W_{10}) kompozytów typu zapraw przedstawia rys.4.36 i 4.37 (piasek $<1\text{mm}$) oraz rys.4.38 i 4.39 (piasek $<0,25$).



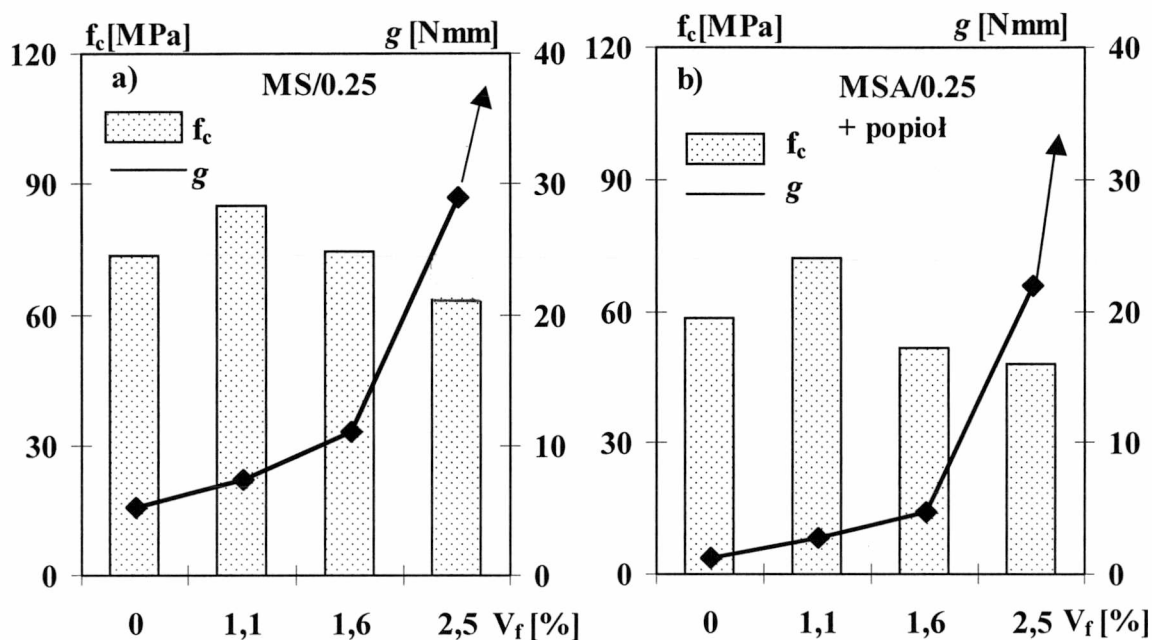
Rys.4.36 Wpływ zawartości włókien ($V_f=0-3\%$) na wytrzymałość f_c i parametr g kompozytów typu zapraw, piasek $<1\text{mm}$: a) bez pyłu,
b) z pyłem krzemionkowym

Jak wynika z danych przedstawionych na rys.4.36 przy niewielkiej zawartości włókien obserwuje się zwiększenie wytrzymałości f_c co wyjaśniono pękaniem włókien. Zakresowi wzrostu f_c odpowiada stopniowy wzrost parametru g . Osłabieniu kompozytu zwiększeniem zawartości włókien (zmniejszenie f_c), odpowiada wzrost całkowitej energii i wystąpienie przegięcia na krzywej zawartość włókien-parametr g , związane z przejściem przez włókna kontroli przepływu mieszanki, rys.4.37.

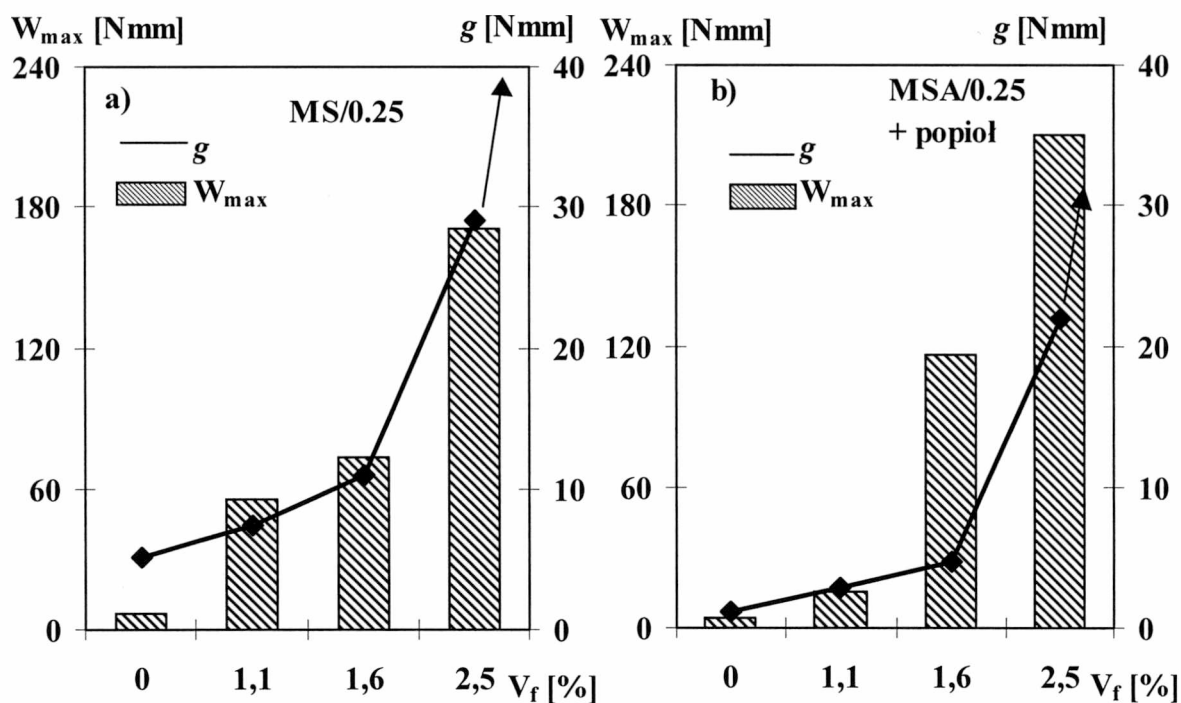


Rys.4.37 Wpływ zawartości włókien ($V_f=0-3\%$), na W_{max} i parametr g kompozytów typu zapraw z pyłem krzemionkowym, piasek<1mm

Jak wynika z rys. 4.38 i 4.39 istotny wzrost pochłanianej energii w próbach zginania występuje przy takiej zawartości włókien, przy której występuje ich współdziałanie (wzrost granicy płynięcia). Wynika z tego, że minimalna ilość włókien niezbędna do uzyskania efektu wzmocnienia, odpowiada takiej ich zawartości, przy której reologia mieszanki zaczyna być kontrolowana wzajemnym oddziaływaniem włókien, przy założeniu dobrego ich rozproszenia, rys.4.9. W przypadku złego rozproszenia uzbrojenia następuje zmniejszenie efektu zwielokrotnionego zarysowania (rys.4.28, porównaj próbki $1,5\%V_f$ z $3,0\%V_f$).



Rys. 4.38 Wpływ zawartości włókien ($V_f=0-2,5\%$), na wytrzymałość f_c i parametr g kompozytów typu zapraw bez i z popiołem, piasek $<0,25\text{mm}$: a) bez , b) z popiołem



Rys.4.39 Wpływ zawartości włókien ($V_f=0-2,5\%$), na W_{max} i parametr g kompozytów typu zapraw bez i z popiołem, piasek $<0,25\text{mm}$: a) bez , b) z popiołem

Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują, że badania odporności na pękanie kompozytów z dodatkiem pyłu krzemionkowego po 28 dniach twardnienia nie mogą być podstawą do oceny skuteczności mikrozbrojenia.

Stwierdzony wzrost wytrzymałości matrycy w czasie i odpowiednio przyczepności do włókien może być wykorzystany przy zastosowaniu włókien o większej wytrzymałości na rozciąganie od włókien węglowych typu „pitch”.

W przypadku stosunkowo słabych niskomodulowych włókien węglowych typu „pitch” zwiększenie zdolności do odkształceń, przy maksymalnej możliwej do rozproszenia ich ilości, można uzyskać osłabiając wytrzymałość matrycy mniej aktywnym od cementu mikrowypełnieniem. Dodatkowe wzmocnienie uzyskać można przez ograniczenie ilości i wielkości ziaren piasku.

Wykazano, że metodą badań reologicznych można określić optymalną zawartość włókien, niezbędną do zwiększenia odporności na pękanie kompozytów mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania, i że zawartość ta jest determinowana reologicznymi parametrami wyjściowej mieszanki.

Otrzymane wyniki wskazują, że przy zawartości włókien odpowiadającej w przybliżeniu liniowemu przyrostowi parametru g wytrzymałość na ściskanie f_c wzrasta, a wzrost odporności na pękanie mierzony energią całkowitą W_{10} jest niewielki. Przy zawartości V_f powyżej przegięcia na krzywej $g - V_f$, f_c wyraźnie maleje, natomiast W_{10} znacząco wzrasta. Wynika z tego, że wzmocnienie kompozytów mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania wymaga takiej zawartości włókien V_{fkr} , przy której występuje wzajemne ich oddziaływanie, którego efektem jest zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i odpowiednio wzrost odporności na pękanie.

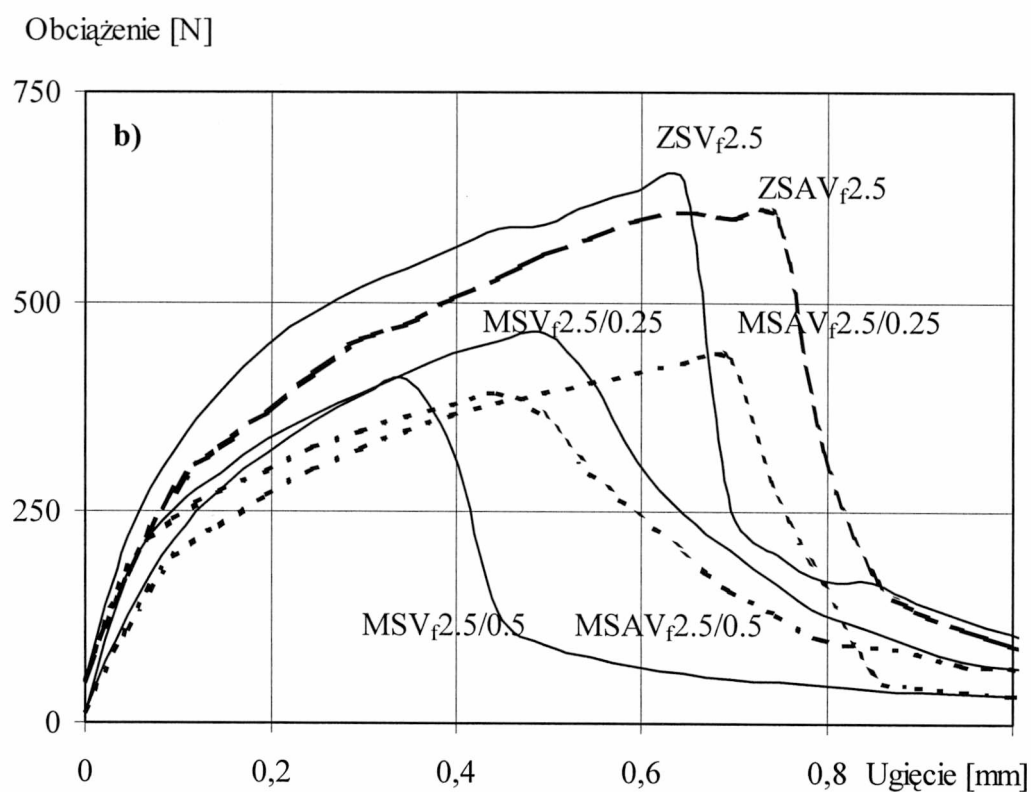
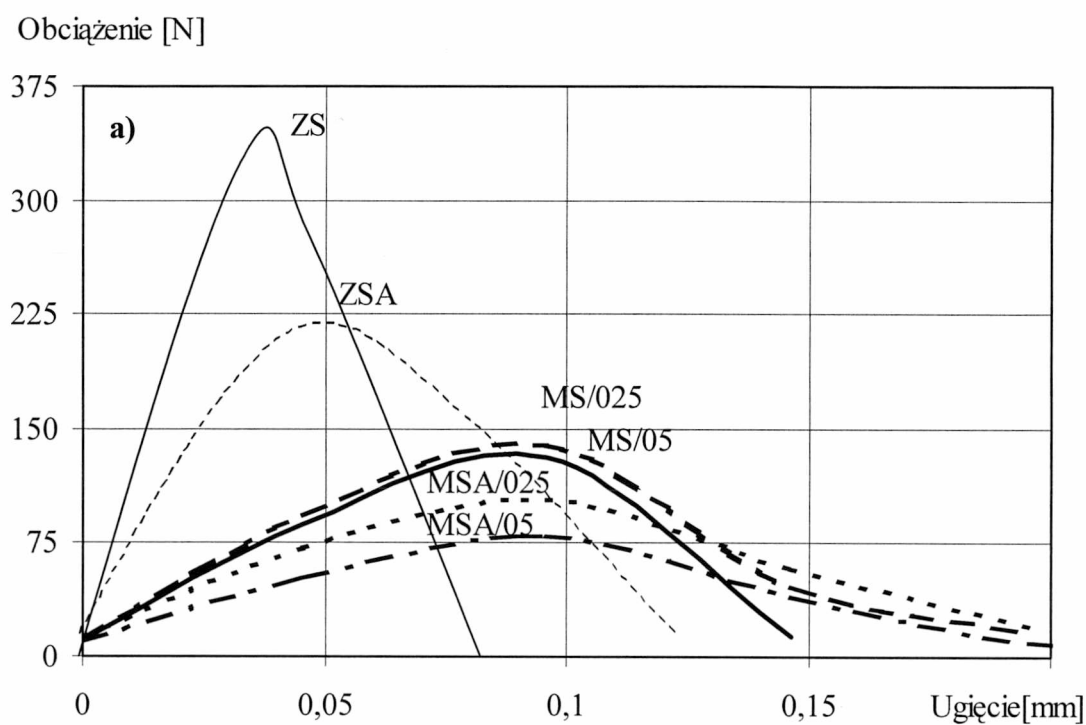
4.3.2 Efekty uzbrojenia zaczynów i zapraw przy wyznaczonej zawartości włókien

Dostępną odległość dla włókien w mieszance określa zawartość zaczynu (ziarna kruszywa są niedostępne dla włókien). Wynika z tego, że przy stałej zawartości włókien V_f w zaprawach i zaczynach, większa ich ilość uzbraja matrycę typu zapraw. Przy tej samej ilości włókien w zaprawach i zaczynach efekt uzbrojenia zależy nie tylko od liczby włókien w jednostce objętości zaczynu, ale i od ich rozproszenia. Zgodnie z wynikami badań (rozdział 4.3.1.) zwiększenie zawartości piasku z ziarnami większymi od odległości między włóknami (tab.4.2) znacznie pogarsza efekt uzbrojenia.

Rysunek 4.40 przedstawia krzywe obciążenie-ugięcie matryc typu zaczynów (Z) i zapraw (M) z uwzględnieniem ich składu tj. uziarnienia i zawartości piasku oraz mikrowypełnień w postaci pyłu krzemionkowego (ZS, MS) i popiołu lotnego (ZA, MA).

W tablicy 4.41 zestawiono wyniki pomiarów wytrzymałości (f_c , f_{kr} , f_{zg}), energii (W_{kr} , W_{max} , W_{10}) i maksymalne ugięcia (u_{max}) matryc oraz odpowiadające im kompozyty z uzbrojeniem $2,5\%V_f$ ($w/b=0,3$; $\phi=0,6$; piasek $<0,5\text{mm}$ i $<0,25\text{mm}$).

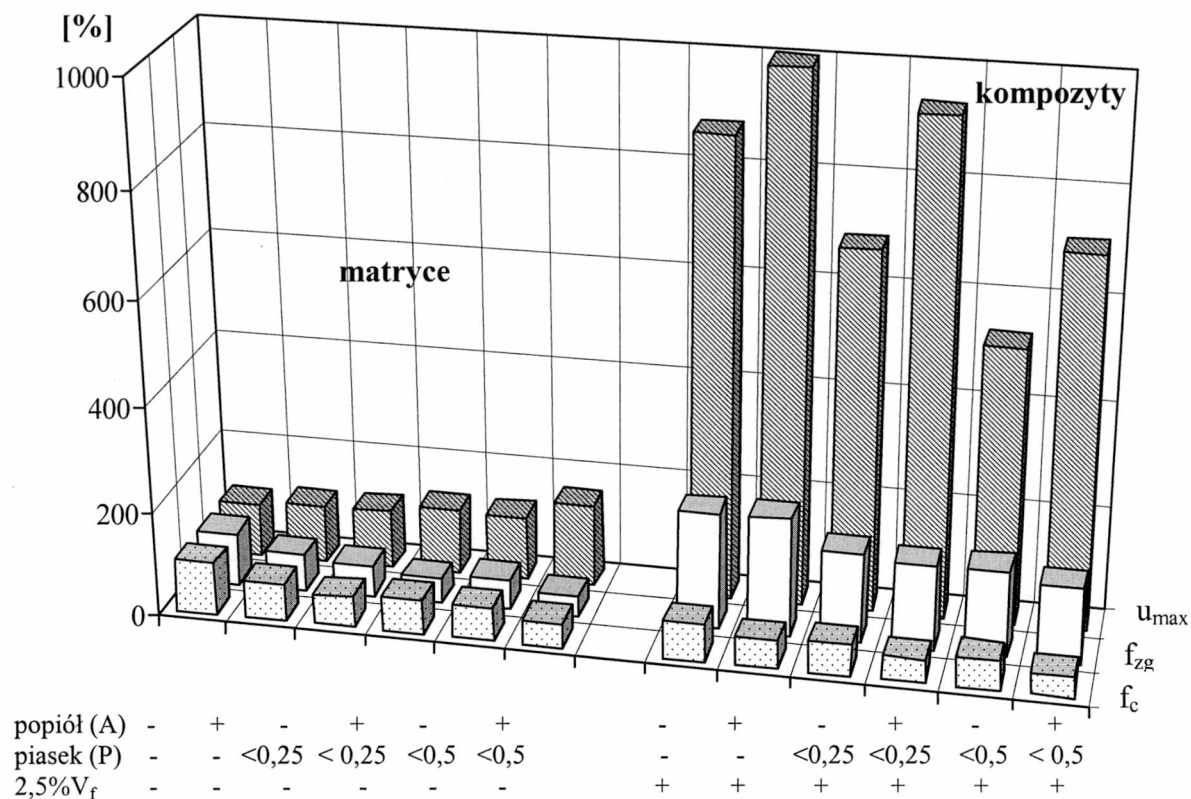
Procentowe zmiany wytrzymałości na ściskanie (f_c), zginanie (f_{zg}) oraz wielkości ugięcia (u_{max}), zaczynów i zapraw bez i z włóknami $V_f=2,5\%$ w stosunku do wyjściowej matrycy przedstawia rys.4.41. Natomiast procentowe zmiany W_{kr} , W_{max} i całkowitą W_{10} , w stosunku do wyjściowego zaczynu ZS, przedstawia rys.4.42. Stan włókien na przełomach po próbach zginania kompozytów bez i z dodatkiem popiołu rys.4.43.



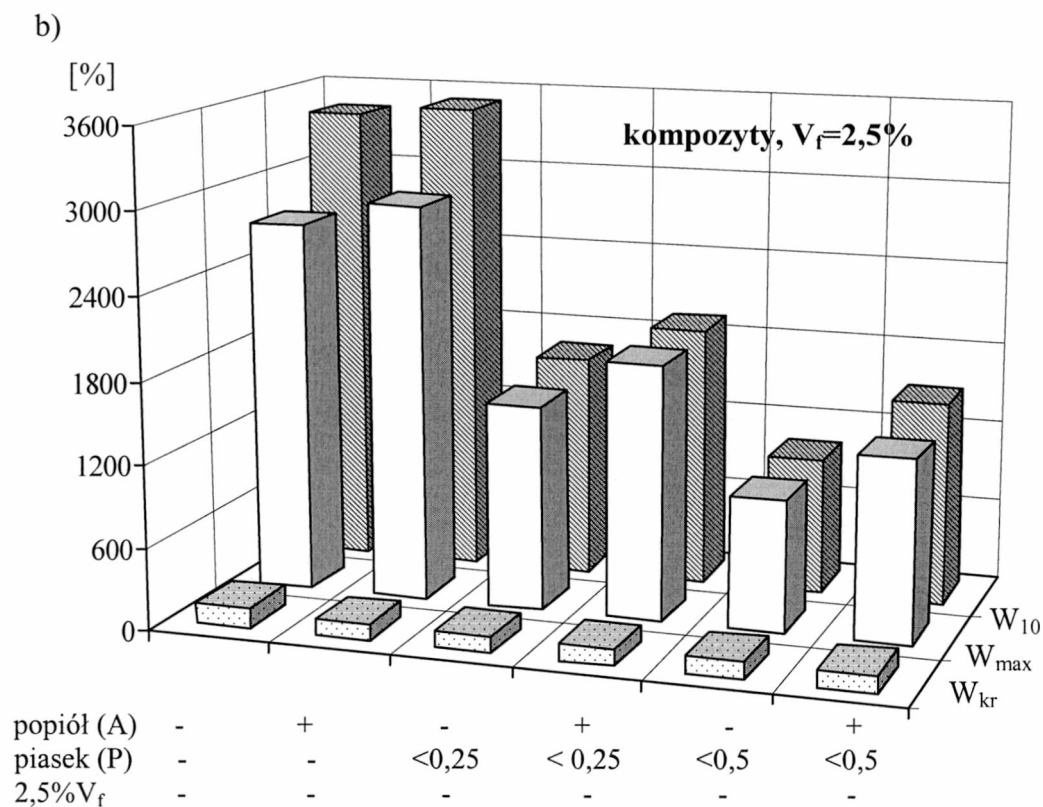
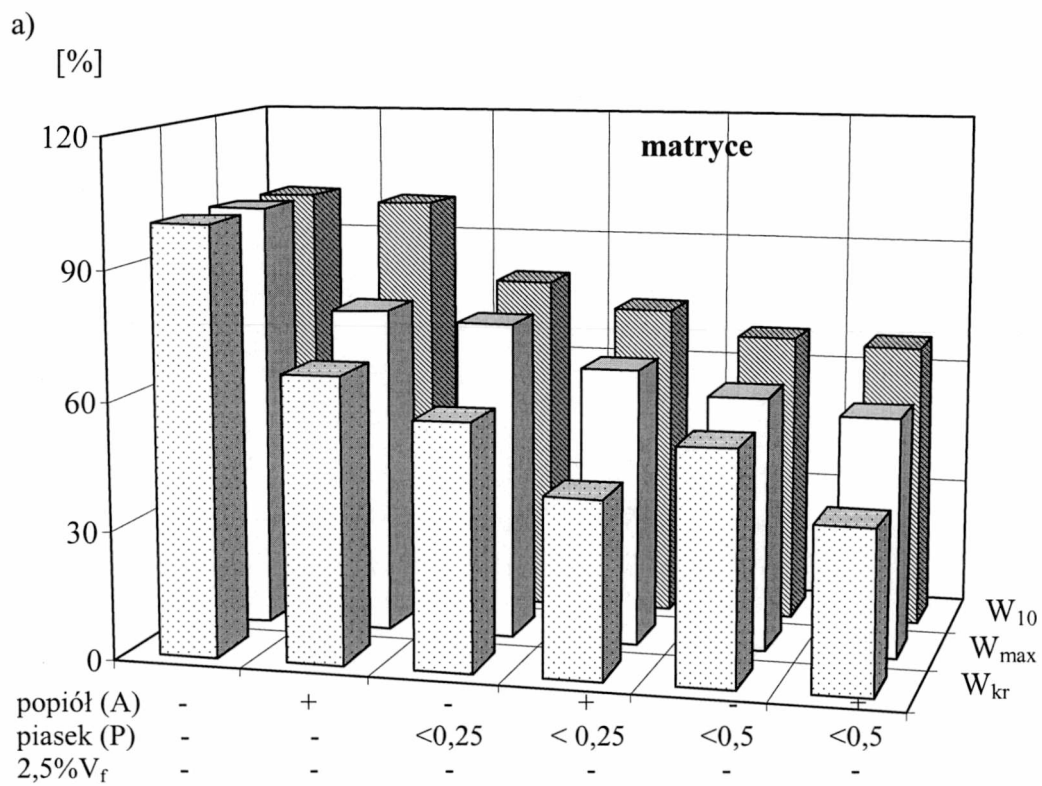
Rys.4.40 Krzywe obciążenie-ugięcie: a) matryc, b) kompozytów, $V_f=2,5\%$

Tablica.4.3 Wytrzymałości (f_c , f_{kr} , f_{zg}), energie W_{kr} , W_{max} , W_{10} , i odpowiadające im maksymalne ugięcie (u_{max}) matryc i kompozytów ($\phi_{st}=0,6$)

Składy	f_c [MPa]	f_{kr} [MPa]	f_{zg} [MPa]	u_{max} [mm]	W_{kr} [Nmm]	W_{max} [Nmm]	W_{10} [Nmm]	E_d [GPa]
ZS	107	7,4	7,5	0,073	10,5	11,2	11,6	-
ZSA	75	5,1	5,2	0,08	7,0	8,6	11,1	-
MS/0.25	73	4,1	4,5	0,081	6,0	8,3	10,21	21,5
MSA/0.25	58	2,9	3,4	0,091	4,3	7,3	8,58	18,3
MS/0.5	69	3,9	4,2	0,089	5,7	6,7	7,9	30,1
MSA/0.5	50	2,5	2,8	0,115	4,0	6,3	7,8	29,4
ZSV _f 2.5	75	7,8	16,9	0,637	15,9	306,7	396,5	28,1
ZSAV _f 2.5	68	7,2	17,2	0,766	12,3	327,6	404,9	25,0
MSV _f 2.5/0.25	64	5,8	12,8	0,500	12,2	170,4	189,8	28,0
MSAV _f 2.5/0.25	48	5,6	12,1	0,680	12,1	210,2	223,1	24,9
MSV _f 2.5/0.5	59	5,5	12,2	0,384	13,0	109,1	117,5	30,6
MSAV _f 2.5/0.5	44	5,4	10,8	0,515	12,5	151,0	173,0	28,2



Rys.4.41 Procentowe zmiany wytrzymałości na ściskanie (f_c), zginanie (f_{zg}) oraz ugięć (u_{max}), matryc i kompozytów bez i z włóknami ($V_f=2,5\%$) w stosunku do wyjściowego zaczynu (ZS)



Rys.4.42 Procentowe zmiany energii W_{kr} , W_{max} , W_{10} w stosunku do wyjściowego zaczynu ZS: a) matryce, b) kompozytów, $V_f=2,5\%$

a)



b)



Rys.4.43 Przełomy po próbach zginania kompozytów typu: a) zaczynów, b) zapraw, uzbrojonych niskomodulowymi włóknami węglowymi

Jak wynika z krzywych obciążenie-ugięcie (rys.4.40) największy efekt wzmocnienia wystąpił w kompozytach typu zaczynów modyfikowanych popiołem. Obliczony w stosunku do wyjściowej matrycy ZS wzrost energii całkowitej (W_{10}) wynosi 3418% w kompozytach bez popiołu i 3490% z popiołem, rys.4.42. W kompozytach typu zapraw efekt ten jest dużo mniejszy, zależy od uziarnienia piasku i dodatku popiołu, a mierzony W_{10} wynosi odpowiednio 1916% bez i 1491% z popiołem.

Analiza wpływu piasku na zmniejszenie efektu uzbrojenia mierzonego energią odpowiednio do: zarysowania (W_{kr}), maksymalnego obciążenia (W_{max}) i całkowitej (W_{10}), (tab.4.3, rys.4.42) wskazuje, że piasek najmniej zmniejsza W_{kr} (20-30%), dużo W_{max} (45-70%) i podobnie W_{10} (45-72%). Najmniejsze efekty wzmocnienia uzyskano dla kompozytów z największym ziarnem piasku bez dodatku popiołu.

Otrzymane wyniki wskazują, że odporność na pękanie badanych kompozytów kontroluje głównie zwielokrotnione zarysowanie, a wielkość wzmocnienia (f_{zg} , W_{max}) i odpowiadające mu ugięcie (u_{max}) znacznie się zmniejsza przy zmianie matrycy z zaczynu na zaprawę. Przy uwzględnieniu, że same włókna pogarszają matrycę (f_c zaczynu ZS ze 107 MPa zmniejsza się po dodaniu 2,5% włókien do 75), dodatkowe osłabianie jej piaskiem pogarsza efekt uzbrojenia.

Uzyskane wyniki wskazują, że użyte mikrowłókna do uzbrajania matryc typu zaczynów i zapraw umożliwiają uzyskanie dużego efektu wzmocnienia mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania. Mikrowłókna dobrze kontrolują proces inicjacji rys i niewiele ich propagację, szczególnie w kompozytach typu zaczynów. Wyniki obserwacji przełomów częściowo wyjaśniają przyczyny takiego zachowania. W kompozytach typu zaczynów o większej wytrzymałości f_c (ZSV_f i $ZSAV_f$) obserwuje się mniej spękań i więcej zrywanych włókien, rys.4.43. Natomiast w osłabionych piaskiem zaprawach, występuje znacznie więcej mikrospękań i brak jest zrywania włókien, rys.4.43.b. Wywlekanie włókien ze słabszej i bardziej spękanej na mikropoziomie matrycy jest ułatwione. Otrzymane wyniki jednoznacznie potwierdzają niecelowość stosowania mikrowłókien do kontroli propagacji rys.

4.3.3 Próba zwiększenia kontroli propagacji rys dłuższymi włóknami

Stwierdzony brak kontroli propagacji rys, po przekroczeniu maksymalnego obciążenia w kompozytach uzbrojonych mikrowłóknami, wynika ze zbyt małej ich wytrzymałości i długości. Do kontroli propagacji rys w badanym zakresie wymagana jest znacznie mniejsza zawartość włókien o odpowiedniej wytrzymałości i długości. W celu ograniczenia katastroficznego pęknięcia kompozytów, część mikrowłókien zastąpiono niewielką ilością dłuższych włókien szklanych, tab.3.2 [44,100]. Hybrydowe uzbrojenie zastosowano w kompozytach, które charakteryzowały się największym efektem wzmocnienia ($ZSAV_f 2.5$, $MSAV_f 2.5/0.25$), zastępując $V_f=0,5\%$ mikrowłókien węglowych, czterokrotnie dłuższymi włóknami szklanymi Cem-FIL, składy tab.4.3.

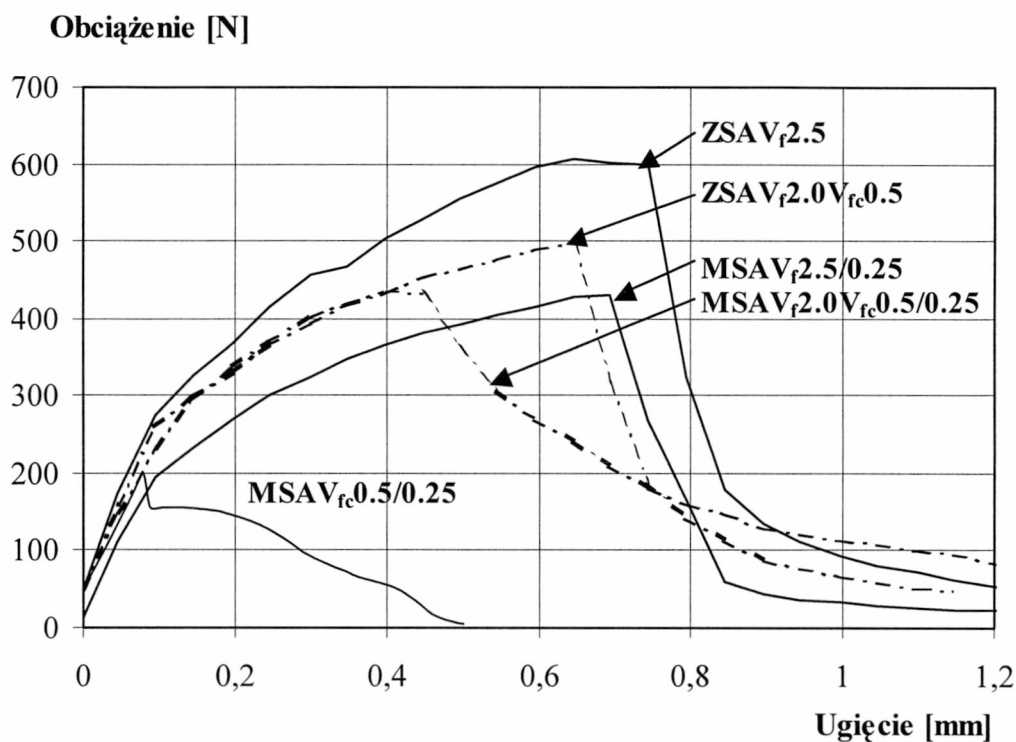
Na rys.4.44 pokazano krzywe obciążenie-odkształcenie kompozytów typu zaczynów i zapraw $V_f=2,5\%$ ($ZSAV_f 2.5$, $MSAV_f 2.5/0.25$) bez i z podstawionymi włóknami szklanymi $V_f=0,5\%$. Dodatkowo na rys.4.44 pokazano wykres matrycy typu zapraw z dodatkiem tylko włókien szklanych $V_f=0,5\%$ ($MSAV_{fc} 0,5$). W tablicy 4.4 zestawiono wyniki pomiarów podstawowych właściwości mechanicznych kompozytów, a rys.4.45 pokazuje efekt wzmocnienia za pomocą mierzonych energii W_{kr} , W_{max} , W_{10} .

Dodatkowo, podczas obciążania próbek z włóknami szklanymi i porównawczymi wykonano pomiar emisji akustycznej, rys.4.46-48

Przełomy po próbach zginania kompozytów z włóknami węglowymi typu „pitch” oraz z włóknami węglowymi typu „pitch” i włóknami szklanymi Cem-FIL, rys.4.49.

Tab.4.3 Składy zaczynów i zapraw z włóknami węglowymi typu „pitch” $V_f=2,5\%$ i włóknami szklanymi CEM-FIL $V_f=0,5\%$

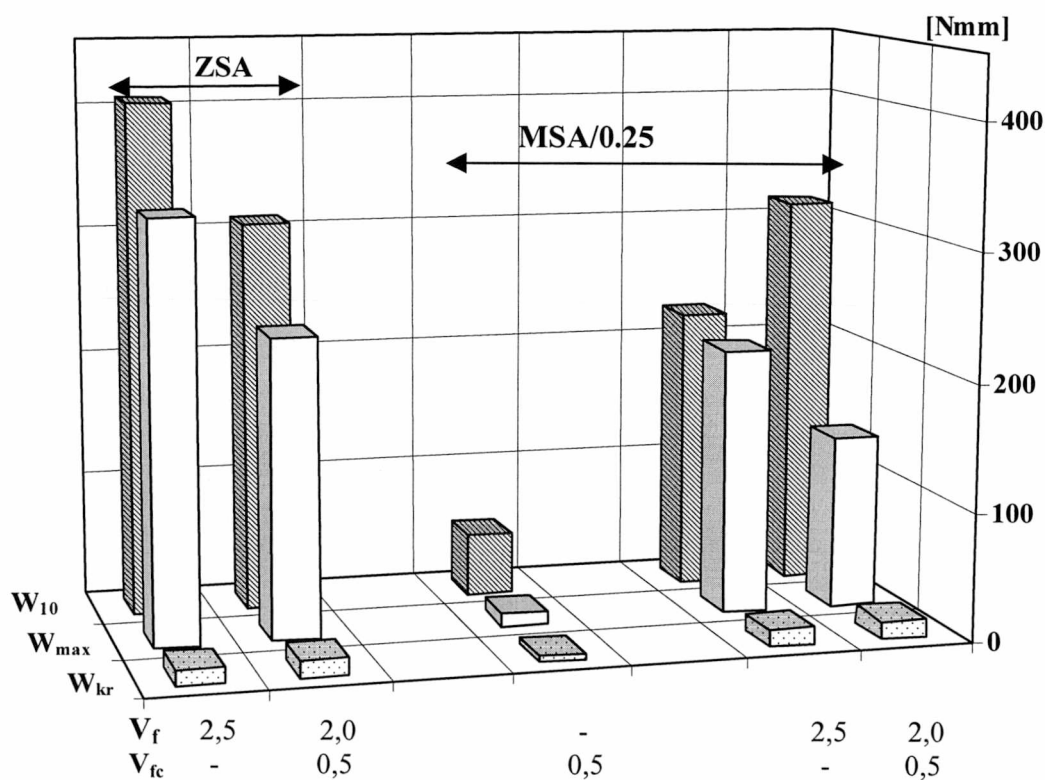
OZNACZENIE	w/c	w/b	V_p/V_z	P/c	Φ_{st}	d_{max} [mm]	S [%]	A [%]	V_f [%]	V_{fc} [%]
ZSAV_f2.5	0,43	0,3	—	—	0,6	—	10	30	2,5	—
ZSAV_f2V_{fc}0.5	0,43	0,3	—	—	0,6	—	10	30	2	0,5
MSAV_{fc}0.5/0.25	0,47	0,32	0,12	0,33	0,6	0,25	10	30	—	0,5
MSAV_f2.5/0.25	0,43	0,3	0,07	0,18	0,6	0,25	10	30	2,5	—
MSAV_f2V_{fc}0.5/0.25	0,47	0,32	0,12	0,33	0,6	0,25	10	30	2	0,5



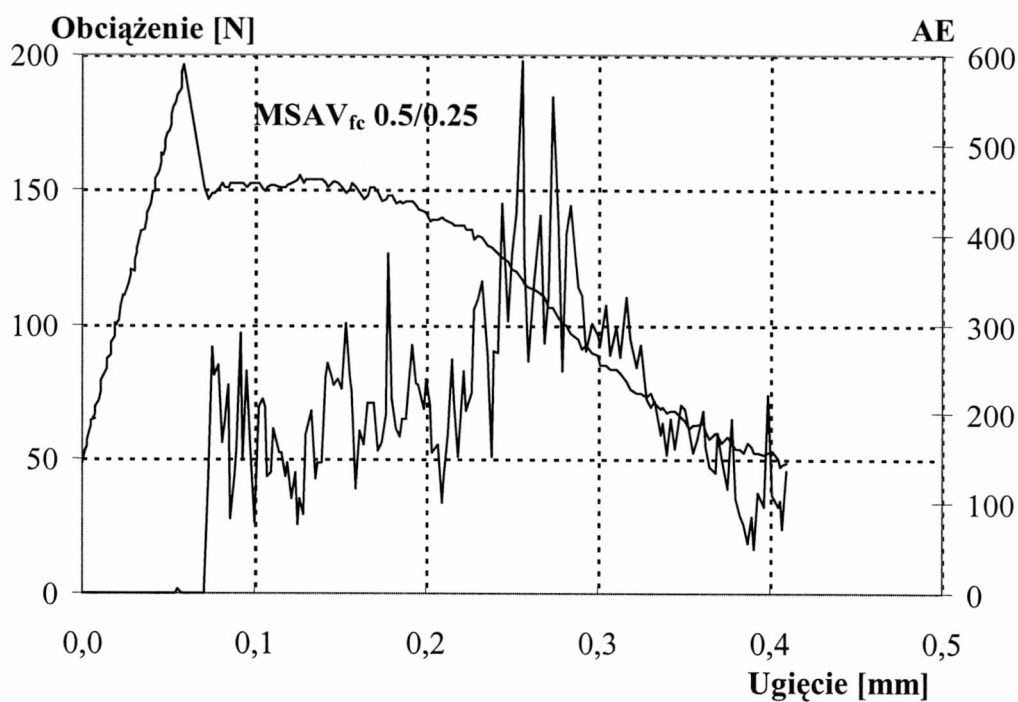
Rys.4.44 Krzywe obciążenie - ugięcie zaczynów i zapraw uzbrojonych mikrowłóknami węglowymi $V_f=2,5\%$ ($ZSAV_f2.5$, $MSAV_f2.5/0.25$) oraz z podstawionymi włóknami szklanymi $V_{fc}=0,5\%$

Tab.4.4. Zestawienie właściwości mechanicznych kompozytów typu zaczynów i zapraw z włóknami węglowymi typu „pitch” i z włóknami szklanymi CEM-FIL

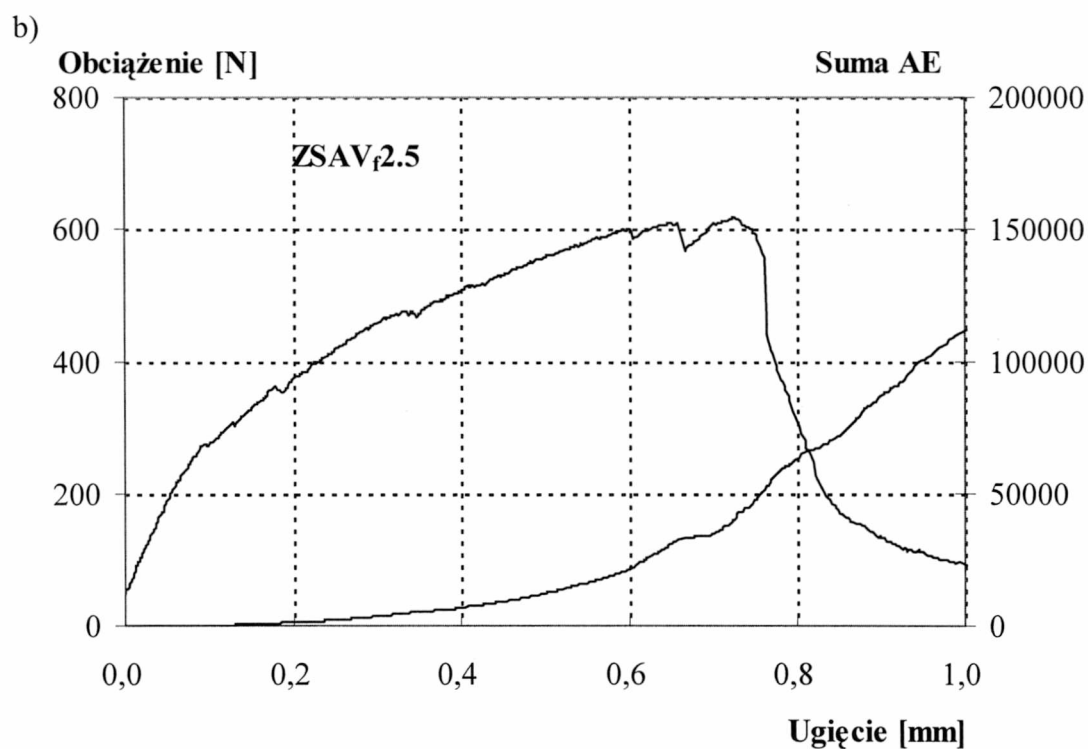
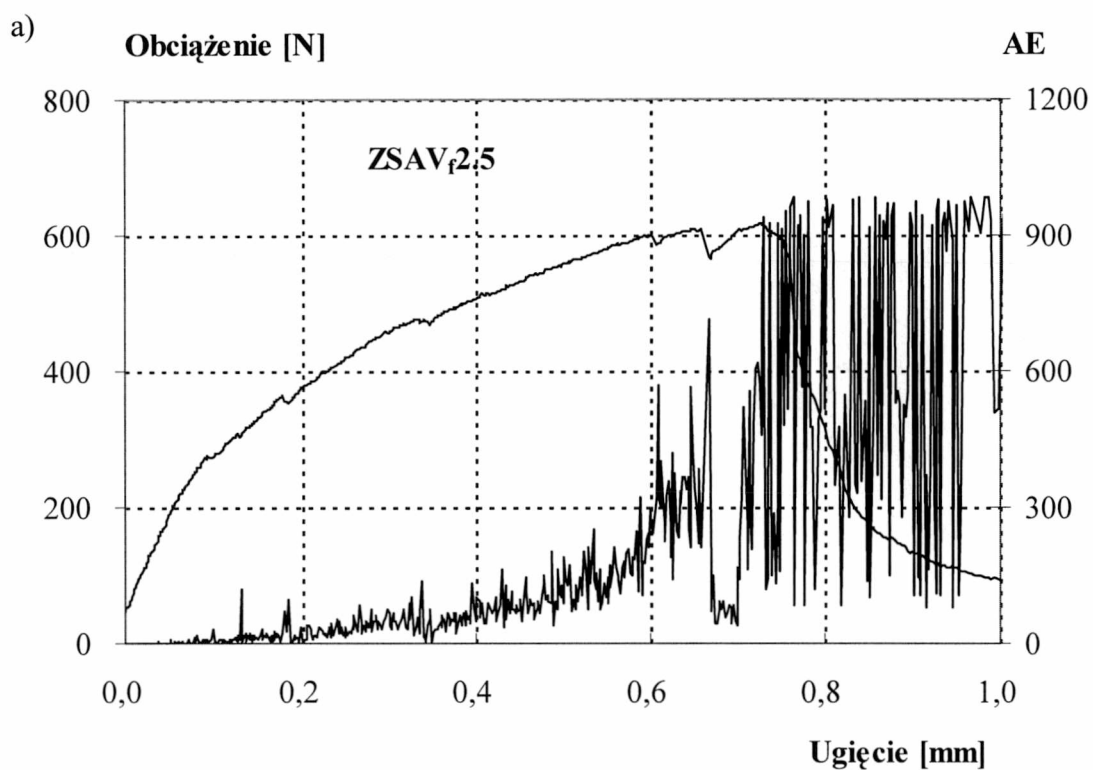
OZNACZENIE	P_{kr} [N]	P_{max}	W_{kr} [Nmm]	W_{max}	W_{10}	f_{kr}	f_{zg} [MPa]	f_{c-56}	E_d [GPa]
ZSAV_f2.5	250,7	617,6	12,3	327,6	404,9	7,2	17,2	68,5	25,0
ZSAV_f2V_{fc}0.5	224,9	497,6	12,9	234,7	308,0	7,1	15,8	65,9	24,3
MSAV_{fc}0.5/0.25	144,9	168,8	4,6	10,1	49,0	4,8	5,6	61,7	27,5
MSAV_f2.5/0.25	190,1	431,6	12,8	210,2	223,1	5,4	12,1	47,7	24,9
MSAV_f2V_{fc}0.5/0.25	190,0	430,5	13,5	136,4	312,2	6,1	12,8	43,9	21,6



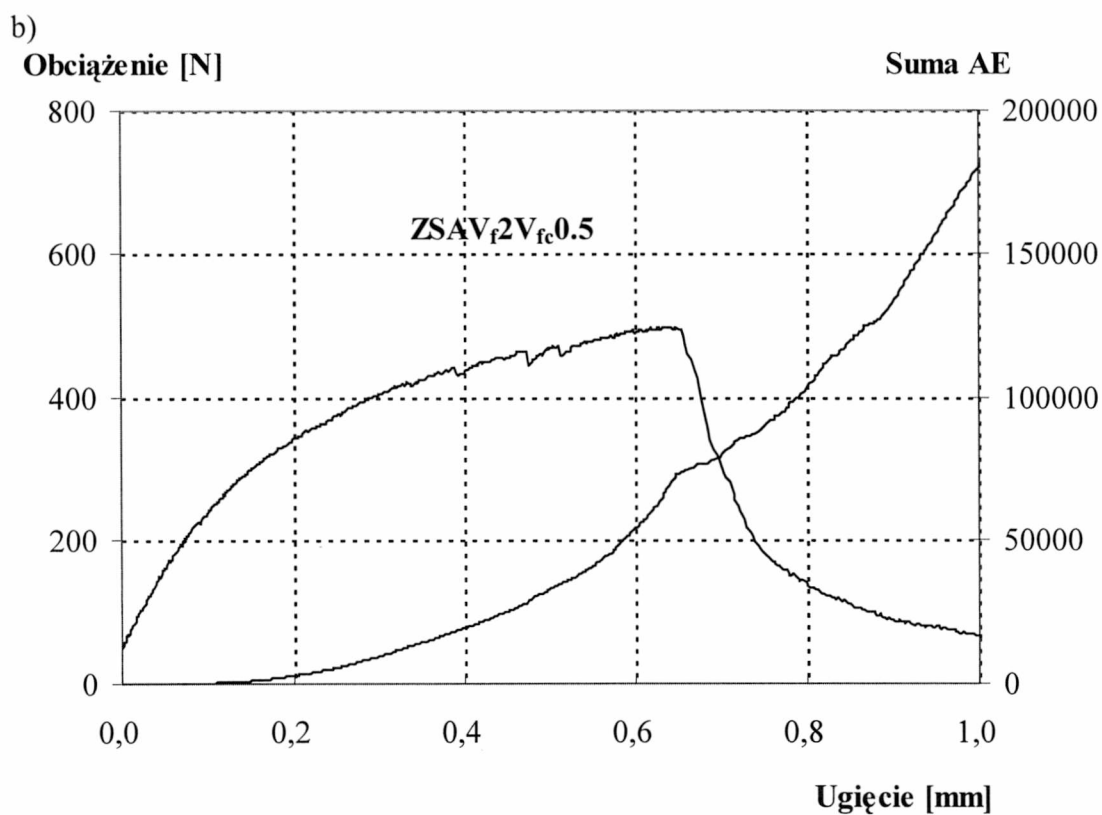
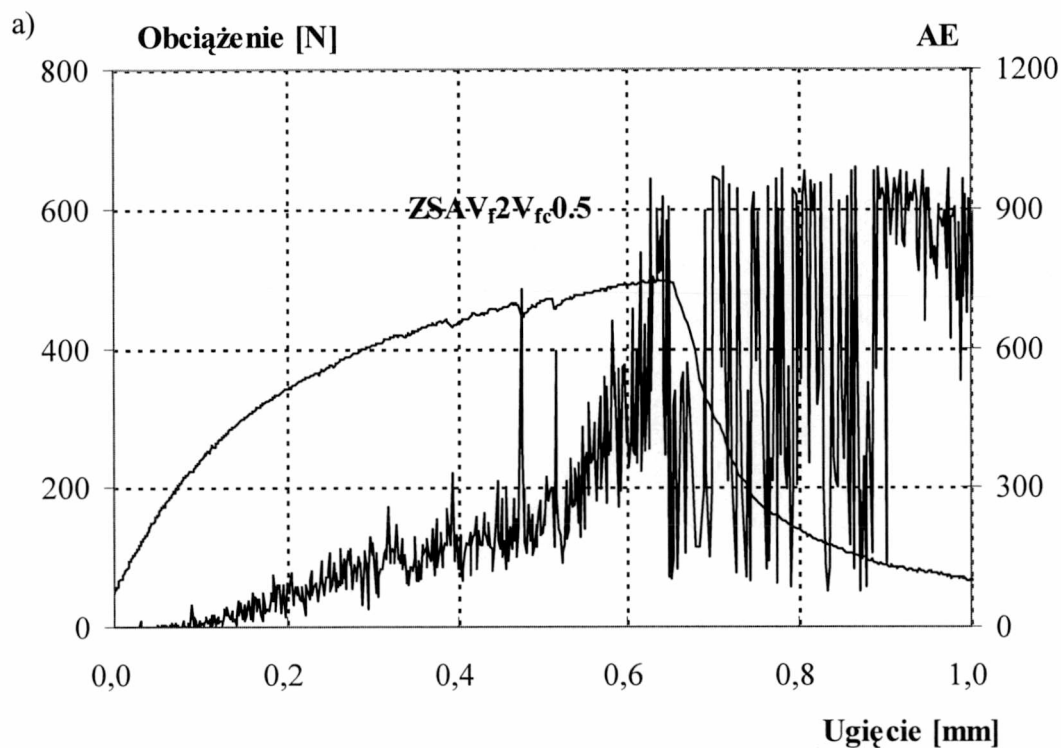
Rys.4.45 Energie: W_{kr} , W_{max} , W_{10} , kompozytów typu zaczynów i zapraw, $V_f=2,5\%$ (ZSA $V_f2,5$, MSA $V_f2,5$) oraz z podstawionymi włóknami szklanymi $V_{fc}=0,5\%$



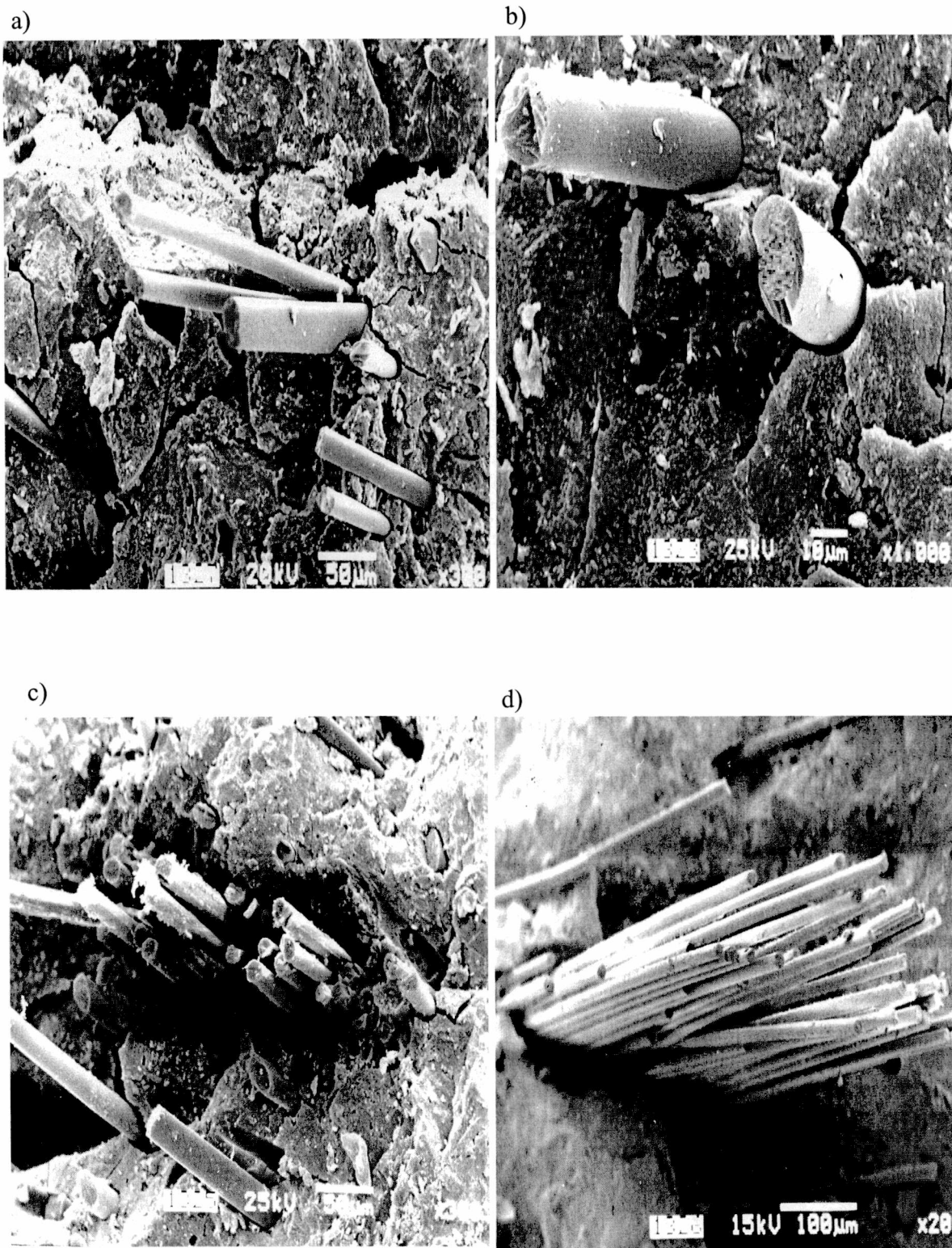
Rys.4.46 Obciążenie i efekty akustyczne w funkcji ugięcia kompozytu typu zapraw z 0,5% V_{fc} włókien szklanych (MSAV $_{fc}$ 0.5/0.25)



Rys.4.47 Krzywe obciążenie-ugięcie oraz: a) AE i b) sumy AE zaczynu ZSAV_{f2.5}



Rys.4.48 Krzywe obciążenie-ugięcie oraz: a) AE i b) sumy AE zaczynu $ZSAV_f2V_{fc}0.5$



Rys.4.49 Przełomy po próbach zginania kompozytów uzbrojonych:
 - mikrowłóknami węglowymi a) zaczyny, b) zaprawy
 - włóknami szklanymi Cem-FIL c) zaczyny, d) zaprawy

Wpływ samych włókien szklanych $V_f=0,5\%$ na zachowanie się pod obciążeniem próbek zapraw wskazuje, że przy badanej zawartości efekt wzmocnienia nie występuje, natomiast nawet niewielki ich dodatek kontroluje proces propagacji rys po przekroczeniu maksymalnego obciążenia. Wskazuje na to również wynik z pomiaru emisji akustycznej rys.4.46. Podstawienie $V_f=0,5\%$ mikrowłókien węglowych włóknami szklanymi w kompozytach typu zaczyn ZSAV_f2.5 nie ma wpływu na kontrolę propagacji rys. Jak wynika z rys.4.49.b,d w kompozytach typu zapraw MSAV_f2.5/0.25 włókna dobrze kontrolowały propagację rys, ale przy zmniejszeniu efektu wzmocnienia.

Z przeprowadzonych badań wynika, że nie można jednocześnie zwiększyć efektu wzmocnienia mikrowłóknami węglowymi i kontrolę propagacji rys włóknami szklanymi po przekroczeniu maksymalnego obciążenia. Uwaga powinna być skierowana na maksymalne zwiększenie efektu zwielokrotnionego zarysowania mikrowłóknami, kosztem utraty kontroli propagacji rys.

Analiza otrzymanych wyników z pomiaru emisji akustycznej (rys.4.46-4.48) potwierdziła możliwość zaobserwowania pierwszego zarysowania, któremu odpowiada stwierdzony na wszystkich wykresach wzrost sumy zliczeń efektów akustycznych, ułatwiający ocenę zwielokrotnionego zarysowania. Pojawienie się zdecydowanych amplitud podczas pomiaru jest informacją o przekroczeniu maksymalnego obciążenia, które przenosi próbka.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na kruche pękanie wysokowytrzymałych matryc cementowych mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania. Przeprowadzone badania wykazały możliwość zwiększenia zamierzonego efektu dostosowaniem wytrzymałości matrycy do parametrów niskomodulowych włókien węglowych typu „pitch”. Wykorzystano metodę badań reologicznych do ustalenia składu matryc i niezbędnej zawartości włókien.

Wykazano, że maksymalna ilość włókien możliwa do rozproszenia zależy od parametrów reologicznych wyjściowej mieszanki i może być wyznaczona z zależności zawartość włókien – granica płynięcia (parametr g).

Przeprowadzone badania nad wpływem domieszek na parametry reologiczne potwierdziły, że popiół i pył krzemionkowy ułatwiają jednorodność rozproszenia włókien. Wyniki badań wpływu popiołu lotnego typu F na właściwości reologiczne mieszanek wykazały wzrost lepkości układu (parametr h), przy jednoczesnym obniżeniu granicy płynięcia, ograniczając segregację składników kompozytu w tym i włókien.

Stwierdzono, że zwiększenie zawartości włókien nieliniowo pogarsza urabialność mieszanki, a znaczny wzrost granicy płynięcia przy zwiększaniu zawartości włókien jest informacją o współdziałaniu włókien i przejęciu przez nie kontroli nad oporem do przepływu. Wykazano, że minimalna zawartość włókien niezbędna do zwiększenia odporności na pękanie zwielokrotnionym zarysowaniem odpowiada takiej ilości włókien, przy której wyraźnie zmienia się kąt nachylenia krzywej g - V_f . Odpowiada temu zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie kompozytów.

Zmiany w czasie wytrzymałości matrycy o małym w/c, zwłaszcza z dodatkiem pyłu krzemionkowego i odpowiadający temu wzrost wiązania matryca-włókno powoduje, że nie można wyznaczyć niezbędnej zawartości uzbrojenia na podstawie 28-dniowej wytrzymałości (f_{c28}). Niejednorodne rozproszenie włókien zwiększa niezbędną ich zawartość do wzmocnienia kompozytu, co powoduje, że ilości wyznaczone teoretycznie są zbyt małe.

Wykazano, że włókna osłabiają matrycę i w połączeniu z podobnym działaniem popiołu (30% cementu) uzyskuje się ograniczenie pękania włókien.

Stwierdzono, że przy wyraźnym efekcie wzmocnienia kompozytu mikrowłóknami węglowymi mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania, kontrola propagacji rys po przekroczeniu nośności jest niewielka, zwiększenie tego efektu dłuższymi i mocniejszymi

włóknami szklanymi, pogarsza efekt wzmocnienia. Wynika z tego, że uzbrajanie badanych kompozytów mikrowłóknami węglowymi-włóknami szklanymi uznać należy za niecelowe.

Zastosowanie zaproponowanych wskaźników pierwszego zarysowania F_s , wzmocnienia F_t i osłabienia F_d do oceny efektywności mikrobrojenia dostarcza więcej informacji o materiale od stosowanych wskaźników odporności na pękanie według ASTM, dokładniej opisując zachowanie się kompozytów HPFRC w poszczególnych etapach odkształcenia. Wykazano, że użycie nawet niewielkiej ilości piasku znacznie pogarsza efekt uzbrojenia. Różnice wyników wytrzymałości i odkształcalności zaczynów i zapraw jednoznacznie wskazują, że optymalne wykorzystanie krótkich włókien o względnie małej wytrzymałości w materiałach opartych na cemencie, wymaga ograniczenia składu matryc do zaczynów modyfikowanych mikrowypełnieniem.

Przedstawiona w pracy metoda dobierania uzbrojenia i składu matryc na podstawie badań reologicznych może być wykorzystana przy produkcji cienkościennych kompozytów typu HPFRC, np.: różnego rodzaju kształtki (rury), posadzki, cienkie przegrody, jak również panele do pokryć dachowych.

Wnioski:

- metodą badań reologicznych można określić niezbędną zawartość włókien do zwiększenia odporności na kruche pękanie kompozytów cementowych mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania, zawartość ta jest determinowana reologicznymi parametrami wyjściowej mieszanki,
- wzmocnienie kompozytów mechanizmem zwielokrotnionego zarysowania wymaga takiej zawartości włókien V_{fkr} , przy której parametry reologiczne mieszanek kontrolują włókna, (przebieg na krzywej V_f – granica płynięcia), zawartości tej odpowiada zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie,
- wyznaczana niezbędna zawartość włókien V_{fkr} , na podstawie właściwości mechanicznych, nie może być oparta na 28 dniowej wytrzymałości,
- zwiększenie odporności na pękanie włóknami węglowymi znacznie się zmniejsza przy zmianie matrycy z zaczynu na zaprawę, co wymaga ograniczenia składu do zaczynów modyfikowanych mikrowypełnieniem,
- zastąpienie części mikrowłókien węglowych dłuższymi włóknami szklanymi powoduje zmniejszenie efektu zwielokrotnionego zarysowania.

LITERATURA

1. Gettu R., Bazant, Z.P., Karr, M.E. (1990) *Fracture properties and brittleness of high-strength concrete*, ACI Materials Journal, Nov.-Dec., 608-618.
2. Malier Y. (1992) *Les bétons hautes performances, Du matériau à l'ouvrage, Caractérisation, durabilité, applications*, Presses de l'ENPC, Paris.
3. Banfill P.,F.,G. (1981) *A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques*. Magazine of Concrete Research, 33, 114.
4. Kucharska L., (1995) *Kompozyty cementowe zbrojone włóknem węglowym bez i z dodatkiem pyłu krzemionkowego*, XLI Konf. Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, 45-52.
5. Maricunte S., Shah S.P. (1995), *High performance cement-based composites for the future*, Proc. 2nd University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Composites. Toronto, March 25-29, Ed. N. Banthia, S. Mindess, The University of B.C., Vancouver, 13-27.
6. Shah S.P., Marikunte S.S. (1993) *Fiber-Reinforced Concrete*, NSF-ACBM Center, Chapter 8, 226-245.
7. Brandt A.M. (1995) *Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, E&FN SPON.
8. Cheyrezy M., Daniel J.I., Krenchel H., Mihashi H., Pera J., Rossi P., Xi Y. (1995) *Specific production and manufacturing issues*, Proc. 2nd Int. RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, Ann Arbor, USA, 26-42.
9. Banthia N., Genois I. (1995) *Pitch-based carbon fibre reinforced cement composites*, Proc. 2nd University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Composites. Toronto, March 25-29, Ed. N. Banthia, S. Mindess, The University of B.C., Vancouver, 1995, 213-227, (rew., Proc. 2nd CANMET/ACI Int. Symp., SP 154, Las Vegas, Nevada, 1995, 315-333).
10. Ohama Y., Amano,M., Endo M. (1985) *Properties of carbon fiber reinforced cement with silica fume*, Concrete International, 58-62.
11. Karihaloo B.L, (1995) *Fracture mechanics and structural concrete*, Longman Scientific & Technical.
12. Ostertag C.P. (1996) *Transition from brittle to quasi-brittle behavior in fiber reinforced brittle matrix composites*, Materials For the New Millenium, 1221-1227.
13. Naaman A., Reinhardt H.W. (1995) *Characterization of high performance fiber reinforced cement composites-HPFRCC*, Proc. of 2nd Int. RILEM Workshop on HPFRCC, Ann Arbor, June, 11-14, (1-23, E & FN Spon)
14. Li V.C., Hashida T. (1992) *Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites*, Applied Mechanics Reviews, 45, 390-398.
15. Kucharska L., Brandt A.M. (1995) *Microstructure and mechanical properties of cement mortars reinforced with pitch-based carbon fibres*, in: High Performance Concrete, Material Properties and Design, Ed. F.H. Wittmann, P. Schwesinger, 269-281.
16. Wu H.C., Li V.C. (1994) *Trade-off between strength and ductility of random discontinuous fiber reinforced cementitious composites*, Cement and Concrete Composites, 16, 1, 23-29.
17. Toutanji H.S., El-Korchi T., Katz R.N. (1994) *Strength and reliability of carbon-fiber-reinforced cement composites*, Cement and Concrete Composites, 16, 15-21.

18. Ozawa K., Maekawa K., Okamura H. (1990) *High performance concrete with high filling capacity*, in Proc.Int.Symp. RILEM Admixtures for Concrete. Improvement of Properties, Barcelona, 51-61.
19. Tangtermsirikul, Sudsangiam S., Deesawangade T., Nimityongskul P. (1995) *Class C fly ash as a shrinkage reducer for cement paste*, Fifth CANMET/ACI, Fly Ash, Silica Fume. Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 1,385-402.
20. Uchikawa H., Uchida S. and Ogawa K. (1983) *Influence of superplasticizer on the hydration of fly ash cement*, Silicates Industriels, 4 (5), 99-106.
21. Nagataki S., Sakai E. and Takeuchi T. (1983) *The fluidity of fly ash cement paste with superplasticizer*, 1st Int. Conference on Use Fly Ash, Silica-Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, PQ, July 31-Aug.5, SP-79.
22. Carrette G.G., Malhotra V.M. (1983) *Early strength development of concrete*, 1st Int. Conference on Use Fly Ash, Silica-Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, PQ, July 31-Aug. 5, SP-79, 765-784.
23. Szwabowski J. (1999) *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
24. Ohama Y., Amano M. (1984) *Effects of silica fume and water-reducing agent on properties of carbon fiber reinforced mortar*, Proc., 27th Japan Congr. Mater. Res., Kyoto,187-191.
25. Kucharska L. (2000) *Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowe*, Cement Wapno Beton , 2, 46-61.
26. Quijun Z., Chung D.D.L. (1989) *Carbon fibre reinforced cement composites improved by using chemical agents*, Cement and Concrete Reserch, 19, 25-41.
27. Lecomte A.,Thomas A. (1992) *Caractère fractal des mélanges granulaires pour bétons de haute compacité*, Materials and Structures RILEM 1992, 25 (149), 255-264.
28. Nishioka K., Yamakawa S., Shirakawa K. (1986) *Properties and application of carbon reinforced cement composites*, in: FRC-86, RILEM Symp., Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Sheffield, July, 95-104.
29. Kucharska L., Brandt A.M. (1993) *Skład, technologia i właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych*, Inżynieria i Budownictwo, 50, 9, 356-360.
30. Tazawa E., Miyazawa S. (1992) *Autogeneous shrinkage of concrete*, Proc. of Japan Concrete Institute, 14, 1, 561-566.
31. Neville A.M. (2000) *Właściwości betonu*, Polski Cement, Wydanie czwarte, Kraków.
32. Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P. (1995) *Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar*, Elsevier Science Inc.
33. Kucharska L., Brandt A.M. (1997) *Pitch-based carbon fibre reinforced cement composites*, in: Proc. Materials Engineering Conference ASCE, Materials for the New Millenium, Ed. K.P. Chong, Waszyngton 1996, 1, 1271-280 (A review. Archives of Civil Engineering, XLIII, 2).
34. Brandt A.M., Kucharska L. (1999) *Developments in cement-based composites*, Congress: Creating with Concrete Dundee, Seminar 4, Theme 1, 6-10.
35. Banthia N., Sheng J. (1996) *Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites*, Cement and Concrete Composites, 18, 4, 251-269.
36. Majumdar A.J. (1980) *Properties of GRC, Fibrous Concrete*, Symp. Concrete International 80, The Construction Press, London, April, 48-68.
37. Pampuch R. (1986) *Włókna węglowe*, Wydawnictwo AGH, Kraków.
38. Ando T., Sakai H., Takahashi K., Hoshijima T., Awata M., Oka S. (1990) *Fabrication and properties for a new carbon fiber reinforced cement product*, ACI SP 124-3., 40-60.

39. Kanno M., Ohama Y., Kawai H., Demura K. (1989) *Fatigue strength of carbon fiber reinforced cement paste and its application to machine parts*, Proc. 32nd Japan Congress on Materials Research, The Society of Materials Science, Japan, Tokyo, 209-212.
40. Banthia N., Sheng J., Mindess S., Ohama Y. (1991) *Toughness characterisation of carbon fibre reinforced cements*, Proc. Int. Symp. on Brittle Matrix Composites, 3, Ed. A.M. Brandt and I.H. Marshall, Elsevier Applied Science, Warsaw, 318-327.
41. Pigeon M., Azzabi M., Pleau R. (1996) *Can microfibres prevent frost damage?*, Cem. and Concrete Research, 26, 8, 1163-1170.
42. Katz A., Bentur A. (1992) *High performance fibres in high strength cementitious matrices*, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Ed. Reinhardt and Naaman, 237-247.
43. Ohama Y. (1989) *Carbon-cement composites*, Carbon, 27, 5, 729-737.
44. Glinicki A.L. (1999) *Mechanizmy kruchości i trwałości kompozytów cementowych z włóknami szklanymi*, Prace IPPT, Warszawa.
45. Biryukovich K.L., Biryukovich Yu.L., Biryukovich D.L. (1961) *Glass-fibre-reinforced cement*, Budivielnik, Kiev 1964, CERA Translation, 12, November 1965 (Strait. Mater.II, 1, 1961, 18-20).
46. Li V.C., Stang H., Krenchel H. (1993) *Micromechanics of crack bridging in fiber reinforced concrete*, J. of Mat. and Structures ASCE, 10, 2, 37-48.
47. Ohama Y., Demura K., Sato Y. (1987) *Development of lightweight carbon fiber reinforced fly ash - cement composites*, in: Proc.Int. Symp. on Fibre Reinforced Concrete, Madras, India, 3.23-3.31.
48. Akichama S., Suenaga T., Banno T. (1986) *Mechanical properties of carbon fibre reinforced cement composites*, The Int. J. Cement Composites & Light Weight Concrete, 8, 1, 21-33.
49. Bayasi M.Z. (1991) *Application of carbon fiber reinforced mortar in composite slab construction*, in: Proc. Int. RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Mainz, June, E&FN Spon 1992, 507-517.
50. Banthia N., Dubeau S. (1994) *Carbon and steel microfiber-reinforced cement based composites for thin repairs*, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, 6, 1, 88-99.
51. Reinhardt i inni (1995) *Future research needs in the field of HPFRCC*, 2nd International Workshop, (HPFRCC-95), Ed. A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, 2, 401-406.
52. Banfill P.F.G. (1981) *A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques*, Magazine of Concrete Research, 33, 114.
53. Banfill P.F.G. (1991) *The rheology of fresh mortar*, Mag. Conc. Res., Mar., 43 (154), 13-21.
54. Banfill P.F.G. (1994) *Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials*, Construction and Building materials, 8 (1), 43-50.
55. Bentur A. (1990) *Microstructure, interfacial effects and micromechanics of cementitious materials*, Ceram. Trans., Advances in Cementitious Materials, Ed. S. Mindess, 16, 523-549.
56. Katz A., Bentur A. (1994) *Mecanical properties and pore structure of carbon fiber reinforced cementitious composites*, Cement and Conc. Research, 24, 2, 214-220.
57. Duval R., Kadri E.H. (1998) *Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes*, Cement and Concrete Research, 28, 4, 533-547.

58. Ukita K., Ishii M., Yamamoto K., Azuma K. (1992), *Properties of high strength concrete using classified fly ash*, in: Proc. 4th CANMET/ACI International Conference on Use of Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey, May 3-8, SP-114, 1, 219-240.
59. Kucharska L., Logoń D. (1997) *The influence of fly ash on rheological and mechanical properties of cement mortars reinforced with pitch-based carbon fibers*, Brittle Matrix Composites 5, Ed. A.M. Brandt and I.H. Marshall, Elsevier Applied Science, Warsaw 104-112.
60. Tattersall G.H., Banfill P.F. (1983) *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman. London.
61. Johnson C.D. (1996) *Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes*, 155-177, Production Methods and Workability of Concrete, Proc. Inter, RILEM Conf. Paisley, Ed. P.J.M. Bartos and D.L. Marrs, Scotland.
62. Soroushian P., Nagi M., Alhozaimy A. (1992) *Statistical variations in the mechanical properties of carbon fiber reinforced cement composites*, ACI Materials Journal, 89, 2, 131-138.
63. Kucharska L., Logoń D. (1996) *Właściwości reologiczne wysokowartościowych zapraw (WWZ) z dodatkiem włókien węglowych*, XLI Konf. Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, 37-44.
64. Logoń D. (1999) *Determination of the mixture proportions of cement composites using rheological methods*, Concrete construction, Polish Academy of Science in Wrocław, 155-162.
65. Park S.B., Lee B.L., Lim Y.S. (1991) *Experimental study on the engineering properties of carbon fiber reinforced cement composites*, Cement & Concr. Research, 21, 589-600.
66. Sakai H. (1994) *Flexural behavior of carbon fibre cement composite*, ACI Special Publication, SP-124, 121-140.
67. Linton J.R., Berneburg P.L., Gartner, E.M. and Bentur, A. (1990) *Carbon fiber reinforced cement and mortar*, in: Mat.Res.Soc. Symp., Ed. S.Mindess and J.Skalny Fiber Reinforced Cementitious Materials, 211, 255-264.
68. Fu X., Lu W., Chung, D.D.L. (1996) *Improvement of the fibre-matrix bond strength by special treatment of the fibre surface and by polymer addition to cement mix*, Cem. and Concr. Res., 26, 7, 1007-1012.
69. Soroushian P. (1990) *Carbon fiber reinforced mortar*, The Construction Specifier, December.
70. Larson B.K., Darzal L.T., Soroushian P. (1990) *Carbon fibre-cement adhesion carbon fibre reinforced cement composites*, Composites, May, 21, 205-215.
71. Katz A., Li V.C. (1995) *Inclination angle effect of carbon fibers in cementitious composites*, J. of Eng. Mech., ASCE, 121, 12, 1348.
72. Bentur A., Wu S.T., Banthia N., Baggott R., Hansen W., Katz A., Leung C.K.Y., Li V.C., Mobasher B., Naaman A.E., Robertson R., Soroushian P., Stang H., Taerwe L.R. (1995) *Fibre-matrix interfaces*, Proc. 2nd Int. RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, Ann Arbor, USA, 150-185.
73. Li V.C., Maalej M. (1996) *Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites*, Cement & Concrete Composites, Elsevier Science, 18, 239-249.
74. Katz A., Li V.C. (1995) *Bond Properties of Micro-fibers in Cementitious Matrix*, Materials Research Society Proceedings, Microstructure of Cement-Based System/ Bonding and Interfaces in Cementitious Materials, S. Diamond et al. Boston , 370, 529-537.

75. Katz A. (1996) *Effect of fiber modulus of elasticity on the long term properties of micro-fiber reinforced cementitious composites*, Cement and Concrete Composites, 18, 389-390.
76. Katz A., Bentur A. (1995) *Effect of matrix composition on the aging of CFRC*, Cement and Concrete Composites, 17, 87-97.
77. Katz A., Bentur A. (1996) *Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of CRFC*, Advanced Cement Based Materials, 3, 1-13.
78. Timoshenko S.P. (1953) *History of Strength of Materials*, McGraw-Hill Book Co, New York.
79. Bentur A., Wu S.T., Banthia N., Baggott R., Hansen W., Katz A., Leung C.K.Y., Li V.C., Mobasher B., Naaman A.E., Robertson R., Soroushian P., Stang H., Taerwe L.R. (1995) *Fibre -matrix interfaces*, Proc. 2nd Int. RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, Ann Arbor, USA, 150-185.
80. Brandt A.M., Kucharska L. (1996) *Pitch-based carbon reinforced concretes*, Proc. Materials Engineering Conference ASCE, Ed. Ken P. Chong, Washington, 1, 271-280.
81. Hannant D.J., Hughes D.C., Kelly A. (1983) *Toughening of cement and other brittle solids with fibres*, Philosophical Transactions of Royal Society, A310, 175-190.
82. ASTM (1994) *Standard test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*, C 1018-94.
83. RILEM Technical Committee 49 TFR (1984) *Draft Recommendations: Testing methods for fibre reinforced cement-based composites*. Materials and Structures, 17, 102, 441-456.
84. *Recommendation for Design and Construction of Steel fiber Reinforced Concrete* (1984) Japan Society of Civil Engineers, Concrete Library, 3, 1-74.
85. Norme Belge NBN B 15-238 (1992), INB, *Essais des bétons renforcés de fibres-Essai de flexion suréprouvettes prismatiques*, 1-9.
86. Mindess S., Taerawe L.R., Lin Y.Z., Batson A and G. (1996) *Standard testing*, HPFRCC 2, Ed. A.E. Naaman, H.W. Eeinhardt, E & FN Spon, London, 383-421.
87. Brandt A.M., Glinicki M.A. (1992) *Flexural behaviour of concrete elements reinforced with carbon fibres*, Proc. Int. RILEM Workshop, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Mainz 23-26, June 1991, E & FN Spon. 288-299.
88. Kucharska L., Brandt A.M. (1996) *Cracking of carbon fibre reinforced mortars*, Proc. Int. Congress, Concrete in the Service of Mankind, Appr. Concr. techn., Dundee, 421-429.
89. Banthia N., Moncef A., Chokri K., Sheng J. (1994) *Micro-fiber reinforced cement composites*, I. Uniaxial tensile response, Can. J. of Civil Engineering, 21, 6, 999-1011.
90. Kucharska, L., Logoń, D. (2000), *Mixture composition of matrices and the reinforcing effect of thin composite elements by carbon microfibres*, Brittle Matrix Composites 6, Ed. A.M. Brandt and I.H. Marshall, Elsevier Applied Science, Warsaw, 147-158.
91. Akichama S., Suenaga T., Banno T. (1984) *The behaviour of carbon fibre reinforced cement composites in direct tension*, The Int. J. Cement Composites & Light Weight Concrete, 6(3), 159-68.
92. Pu-Woei Chen, D.D.L. Chung (1993) *Concrete reinforced with up to 0.2 vol% of short carbon fibres*, Composites, 24, 1, 33-52.
93. Banthia N. (1992) *Pitch-based carbon fiber reinforced cements: structure, performance, applications, and research needs*, Can. J. of Civil Engineering, 19, 1, 26-38.
94. Akihama S., Suenaga T., Nakagawa T., Suzuki K. (1988) *Influence of fibre strength and polimer impregnation on the mechanical properties of carbon fibre reinforced*

- cement composites*, In Proc. RILEM Symposium, Development in Fibre Reinforced Cement and Concrete, Sheffield, 2.3.
95. Akihama S., Suenaga T., Nakagawa T., Suzuki K. (1998) *Properties and application of pitch- based carbon fibre reinforced concrete*, Concrete Int.: Design & Construct., 10, 40-7.
 96. Park S.B., Lee B.L. (1991) *Fabrication of carbon fiber reinforced cement composites*, In Proc. Materials Research Society, Vol.211., Pittsburgh, PA, 255-64.
 97. Bantia N., Sheng J. (1991) *Micro-reinforced cementitious materials*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 211, 25-32.
 98. Katz A. (1995) *Bond properties of carbon fibres in cementitious matrix*, J. Materials in Civil Engineering, 125-128.
 99. Kucharska L, Brandt A.M. (1995) *High performance cement mortars with and without silica fume reinforced with low amount of carbon fibers*, w: Fifth CANMET/ACI Intern. Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, U.S.A., 744-759.
 100. Rudziński L., Turlej B., Bialek M. (2000) *Influence of dispersed fibres content on deformability of fibre reinforced cement composites (FRCC)*, Brittle Matrix Composites 6, Ed. A.M. Brandt and I.H. Marshall, Elsevier Applied Science, Warsaw, 110-117.

Zestawienie wyników

Tablica 4.5 Parametry reologiczne g i h , podstawowe właściwości fizyczne, wytrzymałość na ściskanie zaczynów i zapraw, piasek < 0,25; 0,5 i 1 mm, bez i z dodatkiem pyłu krzemionkowego

Ozn.	g [Nmm·min]	h [Nmm]	n_w -28dni [%]	n_w -56dni [%]	p_o [%]	ρ_p [Mg/m ³]	f_c -28dni [MPa]	f_c -56dni [MPa]
Z	0,402	-8,833	16,97	15,52	28,6	1,91	79	87
ZS	0,316	0,34	18,4	11,03	28,3	1,93	87	107
M/1_(1,5)	0,549	32,349	6,99	6,93	15,48	2,21	64	68
MS/1_(1,5)	0,172	4,069	7,29	6,9	15,29	2,22	77	80
M/0.5_(0,75)	0,167	-0,66	10,4	10,04	21,23	2,12	64	66
M/0.25_(0,75)	0,334	-0,268	10,45	10,16	21,41	2,11	70	78
MS/1_(0,75)	—	—	10,6	10,3	21,57	2,09	76	81
MS/0.5_(0,75)	0,069	-1,739	11,1	10,91	22,39	2,08	77	82
MS/0.25_(0,75)	0,065	10,754	11,15	10,97	22,78	2,06	86	91
MS/0.25_(0,5)	0,045	7,58	12,94	12,29	24,53	2	90	95
M/0.5_(0,25)	0,096	2,98	13,86	13,35	26,63	1,99	68	71
M/0.25_(0,25)	0,08	1,224	13,78	13,47	26,87	1,99	68	79
MS/1_(0,25)	—	—	13,56	12,99	25,49	1,97	82	92
MS/0.5_(0,25)	0,05	-4,189	14,51	13,96	27,39	1,97	87	105
MS/0.25_(0,25)	0,048	-3,505	14,78	14,58	28,57	1,93	94	123

Tablica 4.6 Parametry reologiczne g i h , podstawowe właściwości fizyczne, wytrzymałość na ściskanie zapraw, bez i z dodatkiem pyłu krzemionkowego, $V_f=0-3\%$, piasek $<1\text{mm}$

OZNACZENIE	g [Nmm'min]	h [Nmm]	V_p [%]	p_o [%]	f_c [MPa]	W_{10} [Nmm]	W_{max} [Nmm]
M/1	0,55	32,3	0,7	15,24	52	—	—
MV _f 0.26/1	0,48	22,2	1,46	15,95	49	—	—
MV _f 0.52/1	0,558	36,76	3,0	16,54	59	—	—
MV _f 0.79/1	—	—	3,05	16,76	41	—	—
MV _f 1.5/1	—	—	6,32	17,41	44	—	—
MV _f 3.0/1	—	—	—	18,00	35	—	—
MS/1	0,17	4,06	1,24	16,49	71	19,0	7,1
MSV _f 0.26/1	0,100	23,5	2,27	18,32	90	32,8	9,1
MSV _f 0.52/1	0,175	42,9	2,86	18,38	90	37,1	9,6
MSV _f 0.79/1	0,26	87,3	4,43	18,32	50	52,8	17,1
MSV _f 1.5/1	—	—	5,0	18,49	59	60,5	36,0
MSV _f 3.0/1	—	—	—	19,00	50	110,3	118,3

Tablica 4.7 Parametry reologiczne g i h , podstawowe właściwości fizyczne, wytrzymałość na ściskanie zapraw z różną zawartością popiołu, bez i z włóknami $V_f=3,0\%$, piasek $<1\text{mm}$

Oznaczenie	g [Nmm'min]	h [Nmm]	n_w -56dni [%]	p_o -56dni [%]	ρ_p -56dni [Mg/m ³]	f_{c-56} [MPa]
MSA ₁₀ /1	0,291	13,603	10,00	21,00	2,12	98
MSA ₂₀ /1	0,396	9,702	10,11	21,40	2,10	95
MSA ₃₀ /1	0,656	12,558	9,70	20,17	2,09	70
MSV _F 3/0.5	0,754	70,000	17,40	32,00	1,85	72
MSAV _F 3/0.5	0,960	57,793	20,00	34,50	1,73	69

Tablica 4.8 Parametry reologiczne g i h , podstawowe właściwości fizyczne oraz mechaniczne zapraw bez i z dodatkiem popiołu, przy zawartości włókien $V_f = 0\%$; 1,1% ; 1,6%; 2,5%, piasek $<0,5$; 0,25mm

OZNACZENIE	g	h	n_w	p_o	ρ	ρ_p	P_{kr}	P_{max}	δ_{kr}	δ_{max}	W_{kr}	W_{max}	W_{10}	3kr	5,5kr	10,5kr	I_5	I_{10}	I_{20}	f_{kr}	f_{zg}	f_{c56}	E_d
	[Nmm'min]	[Nmm]	[%]		[Mg/m ³]		[N]		[mm]		[Nmm]			W [Nmm]						[MPa]			[GPa]
MS/0.25	0,053	5,169	14,77	28,31	1,92	2,15	130,1	139,2	0,073	0,081	6,0	8,3	10,2	13,4	—	—	2,4	—	—	4,1	4,5	73,5	21,5
MSV _f 1.1/0.25	0,044	7,377	15,89	29,92	1,88	2,14	160,0	228,7	0,092	0,322	9,1	55,4	62,9	44,4	79,8	—	4,9	8,8	—	3,9	5,5	85,0	29,2
MSV _f 1.6/0.25	0,069	11,007	16,11	29,88	1,85	2,13	200,0	299,8	0,124	0,347	12,0	73,1	87,1	80,8	128,4	152,4	5,0	8,8	10,5	4,8	7,3	74,6	28,3
MSV _f 2.5/0.25	0,167	28,968	16,34	29,85	1,83	2,11	225,1	466,7	0,073	0,500	12,2	170,4	189,8	53,1	124,5	245,7	5,2	12,3	24,2	5,8	12,8	64,0	28,0
MSA/0.25	0,063	1,141	15,36	28,4	1,85	2,04	70,2	79,3	0,073	0,091	4,3	7,3	8,6	9,7	—	—	3,0	—	—	2,9	3,4	58,2	18,3
MSAV _f 1.1/0.25	0,066	2,793	17,99	31,61	1,76	2,04	100,2	142,6	0,052	0,152	4,1	15,8	19,2	16,4	29,0	—	5,2	9,4	—	2,4	3,4	72,2	27,9
MSAV _f 1.6/0.25	0,062	4,649	18,3	31,37	1,71	2,00	130,0	273,0	0,081	0,576	6,6	115,8	131,6	35,5	83,2	153,7	5,4	12,7	23,5	3,1	6,6	51,7	27,2
MSAV _f 2.5/0.25	0,286	21,851	18,64	31,20	1,67	1,94	190,1	431,6	0,092	0,680	12,1	210,2	223,1	58,5	140,5	250,3	5,7	13,7	24,5	5,6	12,1	47,7	24,9
MS/0.5	0,015	5,655	12,94	25,9	2,0	2,24	121,2	131,4	0,078	0,089	5,7	6,7	7,9	—	—	—	—	—	—	3,9	4,2	69,0	30,1
MSV _f 1.1/0.5	0,452	7,762	13,08	25,25	1,93	2,18	180,0	204,9	0,105	0,152	11,3	19,9	22,1	43,9	57,8	—	3,9	5,1	—	4,4	5,0	75,1	30,9
MSV _f 1.6/0.5	0,097	24,061	13,15	25,14	1,91	2,17	210,2	283,2	0,105	0,207	12,9	40,0	52,6	64,8	91,4	112,7	5,0	7,1	8,8	5,1	6,9	70,17	30,7
MSV _f 2.5/0.5	0,452	38,391	13,22	25,03	1,89	2,14	228,1	401,5	0,100	0,384	13,0	109,1	117,5	76,4	134,6	150,0	5,9	10,4	11,5	5,5	12,2	59,17	30,6
MSA/0.5	0,039	1,917	14,94	28,14	1,88	2,13	90,2	103,6	0,073	0,115	4,0	6,3	7,8	—	—	—	—	—	—	2,5	2,8	50,4	29,4
MSAV _f 1.1/0.5	0,109	9,099	15,46	28,10	1,82	2,09	160,1	182,5	0,081	0,137	7,54	17,8	28,9	34,9	51,1	—	4,6	6,8	—	3,9	4,4	71,0	30,4
MSAV _f 1.6/0.5	0,121	24,149	15,27	27,52	1,80	2,06	156,0	230,2	0,090	0,247	8,38	40,9	50,5	45,0	81,0	107,2	5,4	9,7	12,8	3,8	5,6	49,0	30,0
MSAV _f 2.5/0.5	0,598	21,707	15,55	27,20	1,75	1,99	225,1	391,2	0,094	0,515	12,47	151,0	173,0	66,6	152,7	253,0	5,3	12,2	20,3	5,4	10,8	43,8	28,2

Tablica 4.9 Parametry reologiczne g i h , podstawowe właściwości fizyczne oraz mechaniczne zaczynów bez i z dodatkiem popiołu, przy zawartości włókien $V_f = 0\%; 1,1\%; 1,6\%; 2,5\%$

OZNACZENIE	g	h	n_w	p_0	ρ	ρ_p	P_{kr}	P_{max}	δ_{kr}	δ_{max}	W_{kr}	W_{max}	W_{10}	3kr	5,5kr	10,5kr	I_5	I_{10}	I_{20}	f_{kr}	f_{zg}	f_{c-56}	E_d
	[Nmm·min]	[Nmm]	[%]		[Mg/m ³]		[N]		[mm]		[Nmm]			W [Nmm]						[MPa]			[GPa]
ZS	0,316	1,34	11,1	28,3	–	1,93	–	–	–	0,073	10,5	11,2	11,6	–	–	–	–	–	–	7,4	7,5	107	–
ZSA	0,423	1,02	16,0	29,0	–	1,83	–	–	–	0,08	7,0	8,6	11,1	–	–	–	–	–	–	5,1	5,2	75	–
ZV _{2.5}	0,542	29,553	14,60	28,27	2,067	1,92	244,4	405,9	0,088	0,385	15,6	116,2	229,7	69,5	148,0	212,8	5,2	11,4	16,4	7,7	12,7	68,0	31,2
ZSV _{2.5}	0,532	71,406	18,72	32,42	1,97	1,73	305,9	645,9	0,085	0,637	15,9	306,8	396,5	86,8	202,3	375,3	5,5	12,7	23,6	7,8	16,4	75,5	28,1
ZSAV _{2.5}	0,573	78,421	20,83	33,69	1,885	1,69	250,7	617,6	0,078	0,767	12,3	327,6	404,9	64,5	156,5	369,4	5,3	12,7	30,1	7,2	17,2	68,5	25,0

Determination of the mixture proportions of HPFRC to fibers parameters using rheological methods

Dominik Logoń

Summary

Influence of different admixtures and pitch-based fibres on rheological and mechanical behaviour of HPFRC was investigated. The test results are presented concerning the effect of “pitch” carbon fibre reinforcement ($V_f = 0-2.5\%$) of cement pastes and mortars with water/binder ratio $w/b = 0.3$. For mortars three kinds of sand were used: with grains $< 1 < 0,5$ and $< 0,25$ mm in such a proportion to maintain similar contact surface between the sand grains and the paste. In all compositions 10% of cement mass was replaced with silica fume and additionally 30% with fly ash.

It was confirmed the addition of fly ash and silica fume enable to obtain a homogeneous distribution and orientation of fibres. The maximum fibre volume, can be correctly dispersed is related to the initial rheological properties of the mortar, may be determined by the rheological tests. A rapid increase of yield value (σ) after exceeding that characteristic fibre content has been explained by an interaction between fibres which correspond with V_{fc} .

Influence of the matrix composition was analysed after curves obtained from four point bending test. It has been found that when an important reinforcing effect was obtained due to multiple cracking, the crack propagation was only slightly controlled by the fibres. Moreover, it has been proved that the reinforcing effect is considerably reduced by small amount of sand while it is increased by addition of fly ash. In the mortars, the reinforcing effect was smaller than in the pastes and various causes of reduced influence of the fibres on the crack propagation in these two kinds of composites are discussed.

Rozdzielnik

Dokumentacja przewodu doktorskiego w Instytucie Budownictwa Lądowego

4 egz.

Autor

2 egz.

