

Tomasz PONIKIEWSKI \*  
Politechnika Śląska

## PLASTYCZNOŚĆ WŁÓKNO-ZAPRAWY A JEJ WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE

**Streszczenie.** W referacie prezentuje się badania reometryczne zapraw z dodatkiem włókien polipropylenowych oraz stalowych w odniesieniu do normowego oznaczenia plastyczności zaprawy. Badania metodą reometryczną zostały przeprowadzone za pomocą viskomatu NT. Zaprawa była modyfikowana ze względu na zmienny w badaniach wskaźnik W/C, rodzaj włókien, ich długość i udział objętościowy. Analizowane są właściwości reologiczne modyfikowanych włóknami zapraw, a w szczególności poszukiwane są korelacje pomiędzy testem jednopunktowym oraz dwupunktowym – reometrycznym.

## THE PLASTICITY MORTAR WITH FIBRES AND HER RHEOLOGICAL PROPERTIES

**Summary.** The report presents study methods of workability concrete mixture with polypropylene and steel types of fibres and spreading on shock table for plasticity mortar designation for grow and decrease speed Viskomat probe. Research became passed with rheometrical method at help Viskomat NT. Mortar was modified from regard on variable in researches coefficient W/C, type and content of fibres. The rheological behaviour of modified mortars and in particular correlation between the One point test and Two point test – rheometrical are presented and discussed.

### 1. Wprowadzenie

Zastosowanie włókien do wzmocnienia mieszanek na spoiwach cementowych jest znane od lat jako technika poprawy ich właściwości, jednak pojawiają się problemy z urabialnością mieszanek z ich dodatkiem [1,10]. Stosowane standardowe testy są fizycznie niejednoznaczne, a ich nieadekwatność została wykazana w wielu przeprowadzonych badaniach mieszanek z dodatkiem włókien[1,3,9,11]. Norma PN-85/B-04500[2] podaje następujące jednopunktowe metody badania zapraw świeżych: oznaczenie konsystencji przez określenie głębokości zanurzenia stożka pomiarowego w zaprawie oraz oznaczenie plastyczności zaprawy przez określenie średnicy rozplwy próbki zaprawy na stoliku wstrząsowym. Należy zaznaczyć, że jedyną normą uwzględniają zawartość włókien w świeżej mieszance jest PN-EN 1170-1 [4].

---

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Szwabowski

Zastosowanie testu reometrycznego wydaje się być dobrym rozwiązaniem zaistniałych problemów z pomiarem urabialności, ale wymaga to przeprowadzenia badań, uwzględniających różnorodność stosowanych włókien i ich odmienny udział objętościowy w mieszance [6,7,8,9]. Ważne i uzasadnione wydaje się podjęcie badań w kierunku rozpoznania rzeczywistej natury urabialności mieszanek kompozytów o matrycy cementowej zbrojonych włóknami w ujęciu reologicznym. Celem przedstawionych badań było określenie właściwości reologicznych zapraw z dodatkiem włókien polipropylenowych i stalowych oraz ocena zgodności tych właściwości z modelem reologicznym Bingham'a.

## 2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na zaprawach normowych wg PN EN 196-1:1996, ze względu na stałość uziarnienia, przy jednoczesnym mniejszym koszcie i pracochłonności. Zaprawa była modyfikowana ze względu na zmienny w badaniach wskaźnik W/C, rodzaj i długość włókien oraz ich udział objętościowy. Zestawienie badanych włókien przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Charakterystyka badanych włókien polipropylenowych i stalowych

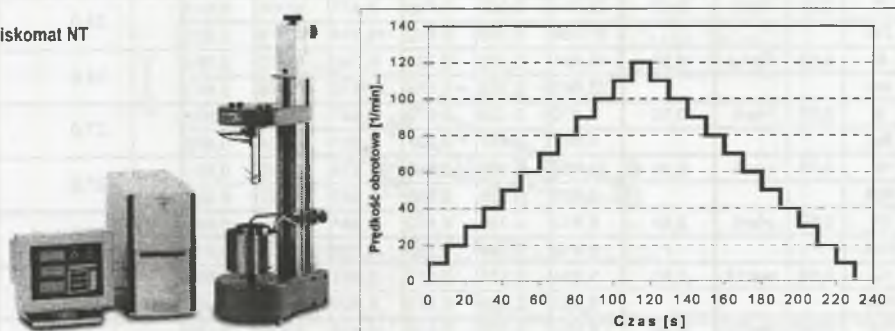
Lp.	Typ włókien	Charakterystyka włókien	Długość włókien	Oznaczenie
1	FIBERMIX	Włókno polipropylenowe elementarne, niewidoczne na powierzchni	3 [mm]	[Fib3]
2	FIBERMIX	jw.	6 [mm]	[Fib6]
3	FIBERMIX	jw.	12 [mm]	[Fib12]
4	HARBOURITE 324	Włókno polipropylenowe fibrylowane, głęboko zbrojące	6 [mm]	[Har6]
5	HARBOURITE 300	jw.	12 [mm]	[Har12]
6	HARBOURITE 320	jw.	19 [mm]	[Har19]
7	HARBOURITE 330	jw.	38 [mm]	[Har38]
8	FIBERMESH	Włókno polipropylenowe fibrylowane, wielowymiarowe, mocno zbrojone	19 [mm]	[Fib19M]
9	BEKAERT	Włókno stalowe elementarne	6 [mm]	[Stal 6]
10	BEKAERT	Włókno stalowe elementarne	13 [mm]	[Stal13]

Zostały one dodane w ilości odpowiadającej zalecanej - dodawanej do mieszanki betonowej, czyli  $0,9 \text{ kg/m}^3$ , co odpowiada  $0,1\%$  objętości ( $0,69 \text{ g/zarób}$ ). Kilka zarobów wykonano z włóknami w ilości  $0,3\%$  oraz  $0,5\%$ . Ilość dodawanego cementu i piasku była stała i wynosiła

odpowiednio 450 g/zarów cementu oraz 1350 g/zarów piasku normowego. Temperatura zarobów w trakcie pomiarów wynosiła  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

W badaniach zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5R. Jako kruszywa użyto piasku do zapraw normowych zgodnie z PN EN 196-1. Zawartość superplastyfikatora FM była stała i wynosiła 2% masy cementu. Sposób mieszania składników zaprawy odpowiada PN EN 480-1 z wyjątkiem włókien, które dodawano do suchych składników (włókna 12-38 mm) lub mieszano najpierw z wodą i superplastyfikatorem (włókna 3-6 mm), a następnie dodawano do piasku i cementu. Reometryczny test urabialności (RTU) wykonano za pomocą wiskozymetru rotacyjnego Viskomat NT (rys. 1). Zasady i metodykę RTU omówiono szczegółowo w [5,7]. Procedurę pomiarową przedstawiono na rys. 1. Oznaczenie plastyczności włókno-zapraw przeprowadzono na stoliku wstrząsowym wg [2]. Składy zapraw do badań przedstawiono w tablicy 2.

viskomat NT



Rys. 1. Wiskozymetr rotacyjny Viskomat NT oraz procedura pomiaru właściwości reologicznych  
Fig. 1. Viscosimeter VISKOMAT NT and measurement rheological properties procedure

Z uwagi na brak informacji i publikacji na temat badań reologicznych zapraw z dodatkiem włókien polipropylenowych i stalowych zachodziła dodatkowo konieczność:

- przeanalizowania właściwości reologicznych zapraw modyfikowanych włóknami i sprawdzenia zgodności uzyskanych wyników z modelem reologicznym Bingham'a.
- analizy korelacji pomiędzy granicą płynięcia  $g$  i lepkością plastyczną  $h$  a plastycznością zaprawy wg rozplywu na stoliku wstrząsowym.

Wynikiem pojedynczego reometrycznego testu urabialności jest zbiór danych obejmujący:

- wyznaczone za pomocą regresji liniowej parametry  $g$  i  $h$  krzywej płynięcia; mogą być wyrażone w jednostkach fizycznych, po uwzględnieniu stałych pomiarowych dla użytego reometru (procedury ich wyznaczania zostały opisane w [5] );

- wartość współczynnika korelacji  $r$  będącego miarą dopasowania otrzymanego zbioru punktów do równania modelu Binghama; jest podstawą do weryfikacji poprawności testu.

Tablica 2  
Skład wybranych zapraw, parametry reologiczne  $[g]$  i  $[h]$ , współ. korelacji  $r$  dopasowania do równania modelu Binghama oraz oznaczenie plastyczności na stoliku wstrząsowym

Zarób	W/C	Włókna	Zaw. [%]	Prędkość rosnąca			Prędkość malejąca			Oznaczenie plastyczności [cm]
				g	h	r	g	h	r	
1	0,45	-	-	16,424	0,467	0,935	9,178	0,516	0,980	21,5
1A				16,270	0,483	0,928	9,680	0,514	0,983	
2	0,50	-	-	11,275	0,332	0,979	7,025	0,347	0,994	27,0
2A				11,680	0,316	0,975	6,040	0,343	0,996	
4	0,50	Fib3	0,10	11,458	0,365	0,955	5,506	0,400	0,989	26,0
4A				11,309	0,375	0,947	4,668	0,413	0,993	
5	0,50	Fib3	0,30	8,338	0,441	0,892	4,073	0,583	0,967	25,0
5A				8,852	0,459	0,874	-0,568	0,592	0,959	
6	0,50	Fib12	0,10	9,282	0,409	0,968	2,464	0,448	0,985	26,0
6A				8,264	0,440	0,935	1,857	0,446	0,980	
7	0,50	Fib3	0,50	22,334	0,230	0,740	7,477	0,391	0,903	24,0
7A				27,836	0,208	0,602	15,514	0,479	0,895	
8	0,50	Fib12	0,30	15,751	0,379	0,761	6,740	0,412	0,764	24,0
8A				22,660	0,303	0,654	17,316	0,248	0,653	
9	0,50	Har6	0,10	7,479	0,429	0,979	6,947	0,431	0,993	27,0
9A				6,663	0,437	0,987	5,857	0,434	0,996	
10	0,50	Har6	0,30	22,635	0,302	0,655	17,424	0,246	0,651	27,0
10A				3,829	0,524	0,956	-3,543	0,597	0,984	
11	0,50	Har6	0,50	5,812	0,375	0,852	-6,247	0,513	0,925	27,0
11A				6,913	0,349	0,853	-4,730	0,495	0,916	
12	0,50	Har12	0,10	5,790	0,511	0,977	3,466	0,541	0,990	29,5
12A				6,433	0,525	0,973	6,305	0,529	0,991	
13	0,50	Har12	0,30	8,159	0,409	0,910	-4,414	0,569	0,959	26,0
13A				8,730	0,344	0,838	-4,139	0,509	0,935	
14	0,50	Har12	0,50	20,933	0,128	0,481	6,889	0,206	0,695	24,5
14A				27,421	0,074	0,317	3,219	0,273	0,700	
15	0,50	Stal6	0,25	10,982	0,350	0,966	7,799	0,363	0,991	27,0
15A				10,923	0,361	0,973	7,151	0,364	0,988	
16	0,50	Stal6	0,50	9,461	0,405	0,961	6,798	0,398	0,985	27,0
16A				10,691	0,428	0,948	7,549	0,427	0,982	
17	0,50	Stal13	0,25	13,804	0,473	0,924	-1,726	0,572	0,967	27,0
17A				10,215	0,538	0,938	-1,639	0,578	0,987	
18	0,50	Stal13	0,50	20,992	0,378	0,857	-0,820	0,565	0,935	26,0
18A				18,368	0,336	0,791	-3,219	0,452	0,938	
19	0,50	Stal13	0,75	11,799	0,302	0,675	0,497	0,181	0,363	26,0
19A				13,256	0,325	0,685	0,258	0,195	0,356	

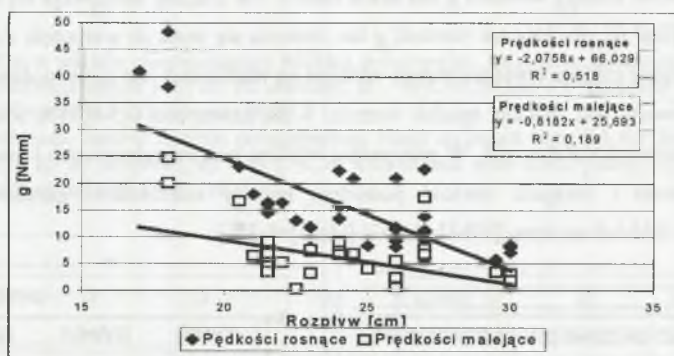
### 3. Wyniki badań

Zależności granicy płynięcia  $g$  i lepkości plastycznej  $h$  od oznaczonej plastyczności na stoliku wstrząsowym zostały przedstawione na rysunkach 2 i 3. Wykazuje ona brak korelacji pomiędzy parametrami reologicznymi  $g$  i  $h$  a rozplywem na stoliku wstrząsowym. W przypadku granicy płynięcia  $g$  dla prędkości rosnących sondy Viskomatu uzyskano naj-

wyższy współczynnik korelacji (0,518). Można stwierdzić, że występuje ogólna tendencja spadku granicy płynięcia  $g$  wraz ze wzrostem średnicy rozpląwu próbki na stoliku wstrząsowym. Podobną zależność obserwujemy w przypadku lepkości plastycznej  $h$  – spadek jej wartości wraz ze wzrostem rozpląwu próbki, ale rozrzut wyników jest bardzo duży (rys.3).

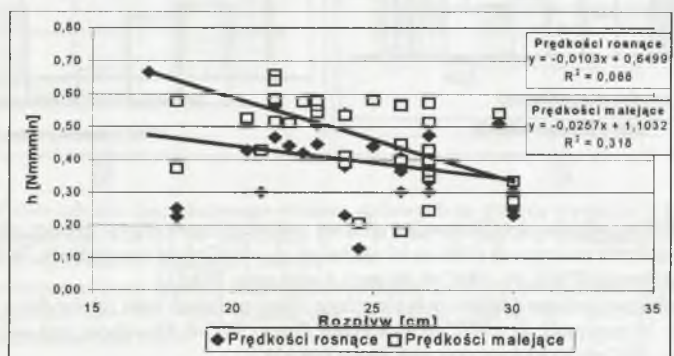
Przeprowadzone badania rozpląwu zapraw z dodatkiem włókien na stoliku wstrząsowym wykazują pogorszenie ich plastyczności wraz ze wzrostem udziału objętościowego dla włókien polipropylenowych krótkich elementarnych i długich. Nie było to obserwowane w przypadku włókien krótkich fibrylowanych [Har6].

Ciekawym zjawiskiem był brak spadku plastyczności przy wzroście długości i zawartości włókien stalowych. Dodanie nawet 0,75% włókien stalowych [Stal 13] spowodowało zawężenie rozpląwu z 27 do 26 cm w odniesieniu do zarobu – świadka. Wpływ dodatku włókien polipropylenowych, a przede wszystkim stalowych, niezależnie od ich długości i dla udziału



Rys. 2. Zależność granicy płynięcia [g] zapraw z różnymi rodzajami włókien od rozpląwu na stoliku wstrząsowym dla prędkości rosnących oraz malejących sondy Viskomat

Fig. 2. Dependence of liquid limit [g] mortar with different kind of fibres and spreading on shock table for plasticity mortar designation for grow and decrease speed Viskomat probe



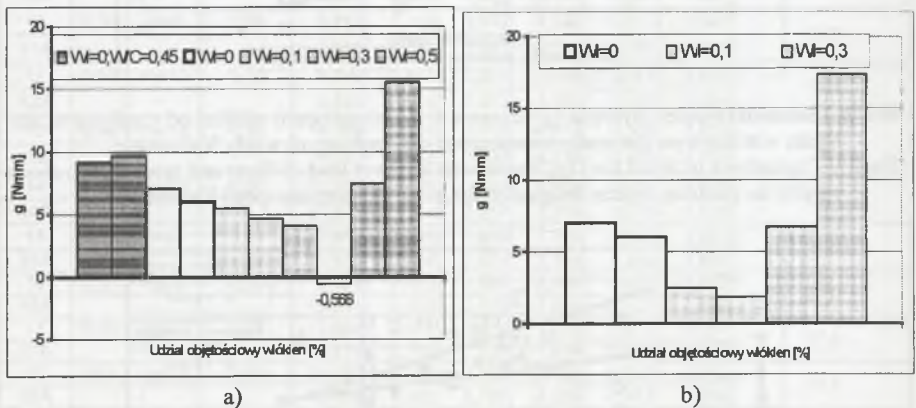
Rys. 3. Zależność lepkości plastycznej [h] zapraw z różnymi rodzajami włókien od rozpląwu na stoliku wstrząsowym dla prędkości rosnących oraz malejących sondy Viskomat

Fig. 3. Dependence of plastic viscosity [h] mortar with different kind of fibres and spreading on shock table for plasticity mortar designation for grow and decrease speed Viskomat probe

objętościowego do 0,5%, na plastyczność zarobu jest zdecydowanie mniejszy niż obniżenie wskaźnika W/C, np. z 0,50 do 0,45.

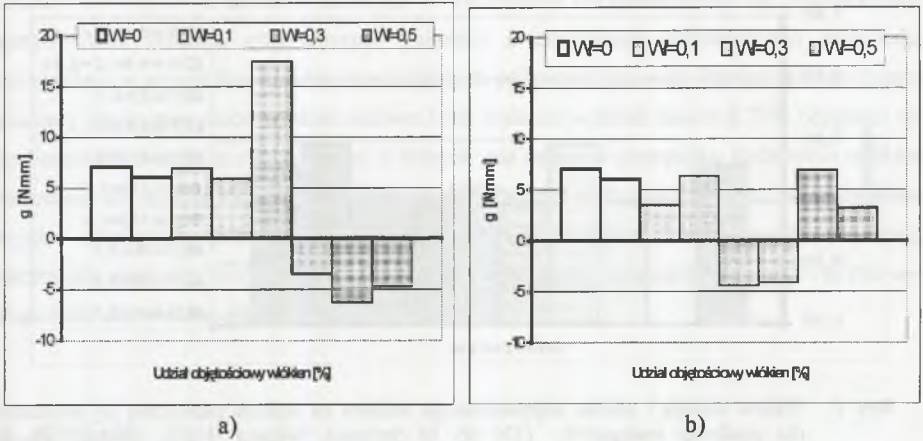
Wyznaczone na podstawie RTU krzywe płynięcia pozwalają w sposób znacznie bardziej dokładny określić parametry reologiczne mieszanek z dodatkiem włókien. Na rysunkach 4-6 zostały przedstawione zależności parametru reologicznego – granicy płynięcia  $g$  od cech włókien, na podstawie przyjętego do analizy modelu Binghama. Dla włókien polipropylenowych elementarnych granica płynięcia obniża się wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien do wartości 0,3%, a powyżej tej wartości wzrasta.

Należy zaznaczyć, że od wartości 0,3% udziału objętościowego maleje współczynnik korelacji  $r$ , szczególnie dla włókien długich. Włókna polipropylenowe fibrylowane charakteryzują się brakiem zmiany wartości  $g$  dla zawartości 0.1%. Inaczej zachowują się włókna stalowe krótkie [Stal 6], dla których wartość  $g$  nie zmienia się wraz ze wzrostem ich zawartości. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien na wielkość  $h$  jest niejednoznaczny (rys. 7 i 8). Obserwowany jest znaczny spadek wartości  $h$  dla zawartości 0,5-0,75% włókien długich polipropylenowych i stalowych. W przypadku włókien polipropylenowych lepkość plastyczna  $h$  wzrastała i osiągała wartość pośrednią między wartościami zarobów świadków W/C=0,50 i 0,45 lub wyższą ([Fib3]=0,3% i [Har6]=0,3%).



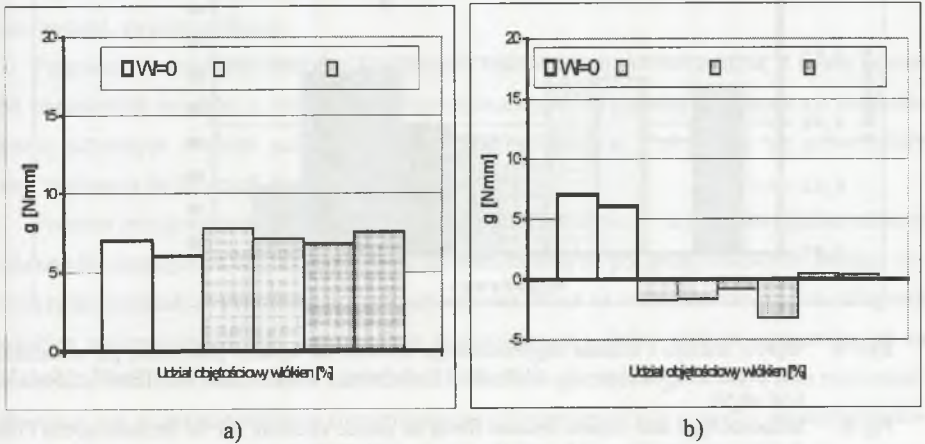
Rys. 4. Wpływ udziału objętościowego włókien polipropylenowych na granicę płynięcia  $g$  dla prędkości malejących (120 do 10 obr/min); a) – W/C=0,45 bez włókien, W/C=0,50 bez i z włóknami [Fib3]; b) – W/C=0,50 bez i z włóknami [Fib12]

Fig. 4. Influence volume fraction polypropylene fibres on liquid limit  $g$  for decrease speed (120 do 10 turn/min); a) – W/C=0,45 without fibres, W/C=0,50 without and with fibres [Fib3]; b) – W/C=0,50 without and with fibres [Fib12]



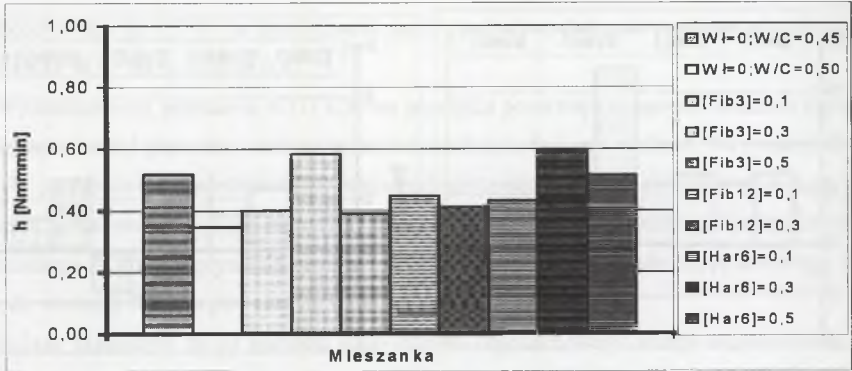
Rys. 5. Wpływ udziału objętościowego włókien polipropylen. na granicę płynięcia [g] dla prędkości malejących (120 do 10 obr/min); a) - W/C=0,50 bez i z włóknami [Har6] ; b) - W/C=0,50 bez i z włóknami [Har12]

Fig. 5. Influence volume fraction polypropylene fibres on liquid limit [g] for decrease speed (120 do 10 tum/min); a) - W/C=0,50 without and with fibres [Har6]; b) - W/C=0,50 without and with fibres [Har12]



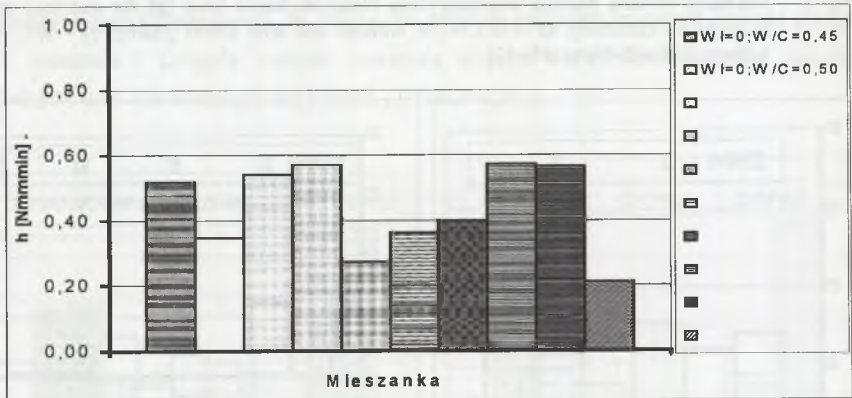
Rys. 6. Wpływ udziału objętościowego włókien stalowych na granicę płynięcia [g] dla prędkości malejących (120 do 10 obr/min); a) - W/C=0,50 bez i z włóknami [Stal 6] ; b) - W/C=0,50 bez i z włóknami [Stal 13]

Fig. 6. Influence volume fraction steel fibres on liquid limit [g] for decrease speed (120 do 10 tum/min); a) - W/C=0,50 without and with fibres [Stal 6]; b) - W/C=0,50 without and with fibres [Stal 13]



Rys. 7. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien na lepkość plastyczną [h] mieszanki dla prędkości malejących (120 do 10 obr/min); Włókna [Fib3], [Fib12], [Har6]; W/C=0,50

Fig. 7. Influence type and volume fraction fibres on plastic viscosity [h] for decrease speed (120 do 10 tum/min); Fibres [Fib3], [Fib12], [Har6]; W/C=0,50



Rys. 8. Wpływ rodzaju i udziału objętościowego włókien na lepkość plastyczną [h] mieszanki dla prędkości malejących (120 do 10 obr/min); Włókna [Har12], [Stal6], [Stal13]; W/C=0,50

Fig. 8. Influence type and volume fraction fibres on plastic viscosity [h] for decrease speed (120 do 10 tum/min); Fibres [Har12], [Stal6], [Stal13]; W/C=0,50

W przypadku włókien stalowych [Stal6] wartość  $h$  była zbliżona do wartości  $h$  zarobu świadka, niezależnie od udziału objętościowego włókien. Włókna [Har12] dla zawartości 0,1-0,3% i [Stal 13] dla zawartości 0,25-0,5% charakteryzowały się wzrostem wartości  $h$  powyżej tej wartości dla zarobu świadka W/C=0,50 i 0,45. Należy podkreślić, że parametry reologiczne zarobów z włóknami stalowymi są porównywalne, a nawet lepsze od parametrów zarobów z włóknami polipropylenowymi. Wcześniejsze obawy co do dodawania sztywnych



włókien stalowych do zarobów badanych w Viskomacie nie potwierdziły się. Podczas przygotowywania zarobów obserwowano trudności z uzyskaniem jednorodności mieszanki, szczególnie w przypadku włókien elementarnych polipropylenowych. Bardzo dobrze rozprzodzały się w mieszance włókna stalowe i ich dodanie w ilości nawet 0,75% objętości nie powodowało tworzenia się tzw. jeży, o których jest mowa w przypadku dodawania włókien stalowych do mieszanek. Wraz ze wzrostem zawartości i długości włókien polipropylenowych – szczególnie elementarnych – ilości włókien pozostających na mieszadle wzrastały; zachodziła konieczność dodatkowego, ręcznego formowania mieszanki. Zjawisko to nie występowało dla włókien stalowych.

#### 4. Wnioski

Nie stwierdzono korelacji pomiędzy parametrami reologicznymi  $g$  i  $h$  a oznaczeniem plastyczności przez rozplływ na stoliku wstrząsowym. Można jedynie stwierdzić, że występuje ogólna tendencja spadku wartości  $g$  wraz ze wzrostem średnicy rozplwy próbki na stoliku wstrząsowym. Dla lepkości plastycznej  $h$  rozrzut wyników jest bardzo duży, można nawet powiedzieć, że przypadkowy.

Parametry reologiczne zarobów z włóknami stalowymi są porównywalne, a nawet lepsze od parametrów zarobów z włóknami polipropylenowymi. Wcześniejsze obawy co do dodawania sztywnych włókien stalowych do zarobów badanych w Viskomacie nie potwierdziły się i zachęcają do dalszych badań z ich udziałem.

Podczas przygotowywania zarobów obserwowano trudności z uzyskaniem jednorodności mieszanki, szczególnie w przypadku włókien elementarnych polipropylenowych. Bardzo dobrze rozprzodzały się w mieszance włókna stalowe. Wraz ze wzrostem zawartości i długości włókien polipropylenowych – szczególnie elementarnych - ilości włókien pozostających na mieszadle wzrastały; zachodziła konieczność dodatkowego, ręcznego formowania mieszanki. Zalecane jest mieszanie włókien elementarnych polipropylenowych z wodą i superplastyfikatorem, a następnie dodawanie do piasku i cementu. Nie było takiej konieczności dla włókien stalowych.

## LITERATURA

1. ACI Committee 544: Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete, Journal of American Concrete Institute: July / 1978, Vol. 75, s. 283-289.
2. PN-85/B-04500: Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
3. McWhannell G.: The effects of polypropylene fibres in fresh concrete, Special Concretes: Workability and Mixing, Edited by J.M.Bartos, E & FN Spon., 1993.
4. PN-EN 1170-1: Prefabrykaty betonowe. Metoda badania betonu zbrojonego włóknem szklanym: Pomiar konsystencji świeżej matrycy cementowej metodą rozplýwu, 1999.
5. Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
6. Szwabowski J., Ponikiewski T.: Analiza testów i czynników urabialności fibrobetonów, III K.N.T., MATBUD'2000, Kraków – Mogilany, 28-30 czerwca 2000 r., s. 331 – 338.
7. Szwabowski J., Ponikiewski T.: O badaniu urabialności mieszanek fibrobetonowych, K.N.T. Procesy Budowlane'2000, Gliwice – Kokotek, 28.09-01.10.2000 r., s. 245 – 252.
8. Ponikiewski T.: Badania urabialności mieszanek kompozytów o matrycy cementowej zbrojonych włóknami, I Seminarium Doktorantów Wyzd. Budow., Gliwice, 6.XII.2000.
9. Ponikiewski T.: Wpływ dodatku włókien polipropylenowych na właściwości reologiczne mieszanek betonowych, II Sem. Doktor. Wyzd. Budown., Gliwice-Wiśła, 22-23.IX.2001.
10. Jamróży Z.: Betony ze zbrojeniem rozproszonym, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 20-23 lutego 2002 r.
11. Szwabowski J., Ponikiewski T.: Rheological properties of fresh concrete with polypropylene fibres, 3<sup>rd</sup> Int. Con., „Concrete and Concrete Structures” Žilina, Slovakia, 24-25.IV.2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Jamróży

**Abstract**

The report presents study methods of workability concrete mixture with polypropylene and steel types of fibres and spreading on shock table for plasticity mortar designation for grow and decrease speed Viskomat probe. Mortar was modified from regard on variable in researches coefficient W/C, type and content of fibres. Together with height of length of fibres, rheological properties of mixtures surrender to making worse. Participation of voluminal fibres has smaller influence on mixture in peculiarities at short lengths oneself fibres.