

UDK 666.971.002.23

Primljeno 20. 3. 2007.

# Utjecaj njege na svojstva mortova s dodatkom polimera

Samo Lubej, Andrej Ivanič

## Ključne riječi

mort, polimeri, mort s dodatkom polimera, Termoelektrana Šoštanj, uzorak, fizikalno-mehanička svojstva

## Key words

mortar, polymers, modified fibre reinforced mortar, thermal power plant in Šoštanj sample, physicommechanical properties

## Mots clés

mortier, polymères, mortier modifié au polymère, centrale thermique de Šoštanj, échantillon, propriétés physicomécaniques

## Ключевые слова

раствор, полимеры, раствор с добавкой полимеров, Тепловая электростанция Шоштань, образцы, физико-механические свойства

## Schlüsselworte

Mörtel, Polymere, Mörtel mit Polymerzugabe, Thermokraftwerk Šoštanj, Prüfkörper, physikalisch - mechanische Eigenschaften

S. Lubej, A. Ivanič

Prethodno priopćenje

## Utjecaj njege na svojstva mortova s dodatkom polimera

U radu se opisuje upotreba mikroarmiranog morta s vlaknima od propilena pri sanaciji plašta dimnjaka termoelektrane Šoštanj u Sloveniji. Prikazana je analiza kvalitete ugrađenog mikroarmiranog morta uzimajući u obzir različite uvjete pripreme, ugradnje i njege. Uspoređeni su rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava uzoraka uzetih s građevine s uzorcima izrađenim u laboratoriju. Autori zaključuju da je za mortove s dodatkom polimera nužna kratkotrajna mokra njega.

S. Lubej, A. Ivanič

Preliminary note

## Influence of cure on the properties of polymer-modified mortars

The use of propylene-fibre reinforced mortar in the remedy of the chimney stack sheathing at the Šoštanj thermal power plant in Slovenia is presented. The fibre reinforced mortar quality analysis is presented for various preparation, placing and cure conditions. Physicommechanical properties of samples taken from the structure are compared with properties of samples prepared in laboratory. The authors conclude that the short-term wet curing is required for polymer-modified mortars.

S. Lubej, A. Ivanič

Note préliminaire

## L'influence de la cure sur les propriétés des mortiers modifiés au polymère

L'emploi des mortiers renforcés de fibres de propylène dans la réfection de l'enveloppe de cheminée à la centrale thermique de Šoštanj en Slovénie est présenté. L'analyse de qualité des mortiers renforcés de fibres de propylène est présentée pour conditions variées de préparation, mise en oeuvre et cure. Les propriétés physicomécaniques des échantillons prélevés sur le site sont comparées avec les propriétés des échantillons préparés en laboratoire. Les auteurs concluent que la cure humide à court terme est nécessaire pour les mortiers modifiés au polymère.

С. Лубей, А. Иванич

Предварительное сообщение

## Влияние ухода на свойства раствора с добавкой полимеров

В работе описывается употребление микроармированного раствора с волокнами из пропилену при санации оболочки дымовой трубы Тепловой электростанции Шоштань в Словении. Показан анализ качества укладываемого микроармированного раствора, принимая во внимание разные условия подготовки, укладки и ухода за ним. Сравнены результаты испытаний физико-механических свойств образцов, взятых из объекта с образцами, сделанными в лаборатории. Авторы делают вывод, что растворам с добавкой полимеров нужен короткий мокрый уход.

S. Lubej, A. Ivanič

Vorherige Mitteilung

## Einfluss der Pflege auf die Eigenschaften des Mörtels mit Polymerzugabe

Im Artikel beschreibt man die Anwendung des Mörtels mikrobewehrt mit Propylenfasern bei der Sanierung der Schlotumhüllung des Thermokraftwerks Šoštanj in Slovenien. Dargestellt ist die Qualitätsanalyse des eingebauten mikrobewehrten Mörtels in Betrachtung der verschiedenen Bedingungen von Vorbereitung, Einbau und Pflege. Die physikalisch - mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper entnommen vom Bauwerk sind mit denen hergestellt im Laboratorium verglichen. Die Verfasser schliessen dass für Mörtel mit Polymerzugabe eine kurzzeitige nasse Pflege notwendig ist.

Autori: **Samo Lubej**, dipl. ing. građ.; mr. sc. **Andrej Ivanič**, dipl. ing. građ., Univerza V Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova 17, Maribor, Slovenija

## 1 Uvod

Ispitali smo mehaničke karakteristike gotove mješavine cementnog morta s dodatkom polimera (PM) za sanaciju oštećenih betonskih površina, koja je sastavljena od cementa, kremenog pijeska granulacije do 2 mm i specijalnih kemijskih dodataka, a to su: lateks, mikrosilika, dodatak za ekspanziju, antipjenilac, modificirana metilceluloza, mineralni stabilizator, superplastifikator, hidratizirano vapno, polipropilenska vlakna i mikrovlakna. Mort je namijenjen sanacijama na građevinama koje su izložene većim mehaničkim i fizikalnim opterećenjima ili kemijskoj koroziji. Mort je upotrijebljen pri sanaciji oštećenih betonskih površina dimnjaka Termoelektrane Šoštanj u Sloveniji.

## 2 Opći podaci o mortu

Promatrani mort ima prikrivena cementna svojstva koja se razvijaju uz reakciju s vapnom koje se oslobađa uz hidrataciju cementa. Zbog toga očvrsnuli mort ima malu vodoupojnost i mnogo je otporniji na koroziju poradi reakcije različitih soli s vapnom.

Proizvođači morta propisali su sljedeće uvjete upotrebe:

- površine betona na koje se mort ugrađuje moraju biti čiste i kompaktne, preporučeno je pranje visokotlačnim vodnim mlazom pod tlakom od 40 MPa
- pripremljena površina mora biti dubinski kapilarno zasićena vodom, ali na njoj ne smije biti vodnog filma koji sprječava dobro vezanje morta na podlogu
- na 100 kg predgotovljene mješavine dodaje se 15 do 16 litara vode
- pri dodavanju vode potrebno je miješanje sve dok mješavina ne postane homogena, potom mora približno 10 minuta sazrijevati, a nakon toga se ponovno miješa
- pripremljeni mort možemo ugrađivati ručno ili postupkom brizganja
- ugrađeni je mort potrebno zagladiti i 3 do 4 dana štiti od utjecaja sunca, vjetra i temperature.

Proizvođači navode sljedeća svojstva morta:

- čvrstoću na savijanje nakon 7 dana do 7 MPa
- čvrstoću na savijanje nakon 28 dana do 10 MPa
- tlačnu čvrstoću nakon 7 dana do 38 MPa i
- tlačnu čvrstoću nakon 28 dana do 50 MPa.

## 3 Opis oštećenja i tehnološkog postupka ugradnje na građevini

Dimnjak Termoelektrane Šoštanj visok je 237 metara. Osnovna je konstrukcija dimnjaka armiranobetonski plašt promjenljiva presjeka, koji je na unutarnjoj strani

po cijeloj visini obložen opekom debljine 10 cm otpornom na kiseline, toplinska izolacija od mineralne vune debljine 6 cm smještena između armiranobetonskog plašta i opeke. Gornji vanjski polumjer dimnjaka je 9,92 m, a donji vanjski 14,32 m.

Prosječna količina dimnih plinova iznosi 1.459.000 m<sup>3</sup>/h, a temperatura se mijenja i iznosi između 140 °C i 150 °C.

Dimnjak je u upotrebi već 28 godina, a oštećen je bio zbog:

- utjecaja okoline
- dinamičkih utjecaja i
- kemijske agresije.

Sanacija dimnjaka uključivala je samo popravak nastalih oštećenja armiranobetonskog plašta, dakle samo obnovu propalih betonskih površina.

Tehnološki je proces sanacije obuhvaćao:

- definiranje propalih mjesta betona, prije svega korozijskih žarišta i pukotina u betonu
- odstranjivanje propalog betona
- izvođenje sanacije propalog betona i armature
- sanaciju pukotina postupkom injektiranja i
- izradu zaštitnog premaza cijele betonske površine dimnjaka.

Tehnološki je proces odstranjivanja propalog betona obuhvaćao:

- pranje betonskih površina vodenim mlazom pod tlakom od 40 MPa i
- ručno odbijanje betona pneumatskim čekićima.

Izgled površine betona dimnjaka nakon odstranjivanja propalog betona vidi se na slici 1.



Slika 1. Izgled površine betona dimnjaka nakon odbijanja betona i pranja vodenim mlazom pod tlakom od 40 MPa

Nakon sanacije armature izvođena je sanacija betonskih površina prema sljedećim postupcima:

- Tankoslojno ravnanje površina (do 3 mm) na mjestima gdje je došlo do odstranjivanja površinskog sloja cementnog kamena i povećanja hrapavosti površine.
- Sanacija oštećenja na području površinskih korozijskih žarišta gdje je beton bio odstranjen do dubine 30 mm.
- Sanacija oštećenog betona u dubinu više od 30 mm.

Za postupak sanacije tankoslojnog ravnanja betonskih površina bio je upotrijebljen cementni mort s dodatkom polimera s maksimalnim zrnom agregata do 0,3 mm, a za postupak sanacije ravnanja, kojih je dubina bila veća od 3 mm, mort s dodatkom polimera s maksimalnim zrnom 2 mm.

Na slikama 2. i 3. prikazan je postupak:

- izvođenja sanacije armature sa zaštitnim premazom i izradom sloja za povećanje adhezije sa sanacijskim mortom
- izvođenje grube sanacije s mortovima s dodatkom polimera.



Slika 2. Izvođenje antikorozijske zaštite armature i nanošenje kremenog pijeska za poboljšanje adhezije sanacijskim mortom



Slika 3. Tehnološki postupak nanošenja morta s dodatkom polimera s ručnim utiskivanjem



Slika 4. Izvedena sanacija betonske površine s mortom s dodatkom polimera

Na slici 4. prikazan je izgled površine betona nakon sanacije s mortovima s dodatkom polimera.



Slika 5. Miješanje morta s dodatkom polimera s maksimalnim zrnom do 2 mm



Slika 6. Prikaz tehnoloških resursa pri sanaciji betona plašta dimnjaka

Sanacija betonskih površina trajala je 230 radnih dana, radovi su smo počeli u listopadu 2003., a završeni su u listopadu 2004. Zbog visine dimnjaka i specifičnosti radova pri sanaciji je upotrijebljena pretežno alpinistička tehnika kretanja radnika s užadi, sanacijski mort s maksi-



malnim zrnem do 2 mm pripremljen je s horizontalnim miješalicama za beton koje su bile smještene na horizontalnim čeličnim balkonima dimnjaka (slika 5.), dok je sanacijski mort s maksimalnim zrnem 0,3 mm bio pripremljen miješanjem s posebnom strojnom rotacijskom miješalicom s 300 okretaja u minuti. Za transport materijala, ljudi i za samo izvođenje radova bile su upotrijebljene konzolne skele kao što prikazuje slika 6.

#### 4 Uzimanje uzoraka na dimnjaku i kontrola mehaničkih svojstava

##### 4.1 Uzimanje uzoraka svježeg morta na gradilištu i kontrola fizikalno-mehaničkih svojstava

Na gradilištu su u pet sljedećih radnih dana uzeti uzorci morta. Uzorci svježe mješavine morta s maksimalnom zrnem agregata do 2 mm bili su na gradilištu pripremljeni miješanjem s horizontalnim miješalicama za beton. Ugradnja u standardne kalupe bila je ručna – bez upotrebe vibracijskog stola.

Ispitivanja prema normama SIST EN 12190 [8] i SIST EN 1015-11 [9] na temelju kojih je određena:

- obujamska masa ( $\rho$ )
- čvrstoća na savijanje ( $f_m$ ) i
- tlačna čvrstoća ( $f_c$ ),

provedena su na pet serija uzoraka označenih s brojevima od 1 do 5 (3 uzorka na seriju) normiranih prizmica 40 x 40 x 160 mm. Uzorci su bili u kalupima dovezeni u laboratorij i svaka je serija obuhvaćala:

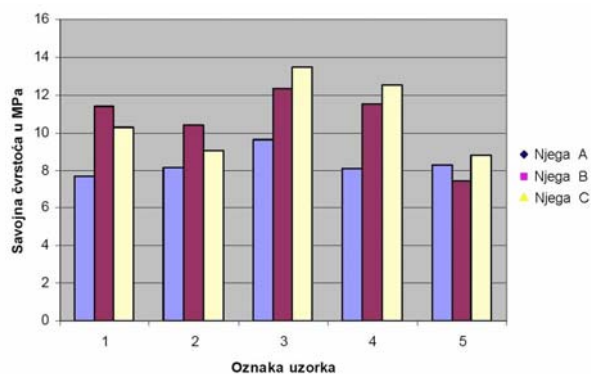
- 24 sata njege u kalupu koji je bio prekriven vlažnom krpom i polietilenskom folijom
- svaki se uzorak serije, nakon vađenja iz kalupa, 27 dana njegovao u vodi (oznaka A)
- sljedeći je uzorak serije, nakon vađenja iz kalupa, 27 dana bio izložen laboratorijskoj klimi pri temperaturi zraka  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i relativnoj vlažnosti zraka  $55 \pm 5\%$  (oznaka B)
- zadnji je uzorak serije 48 sati bio zamotan vlažnom krpom i polietilenskom folijom i nakon toga tijekom 25 dana izložen laboratorijskoj klimi, znači temperaturi zraka  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i relativnoj vlažnosti  $55 \pm 5\%$  (oznaka C).

Ispitivanje nabrojanih fizikalno-mehaničkih svojstava obavljena su 28 dana nakon izrade uzoraka. Za mjerenje mehaničkih karakteristika upotrijebljen je univezalni stroj Zwick/Roell Z010 Materials Testing Machine.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja na uzorcima s gradilišta

Uzorak	Starost (dani)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_m$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	Prosječna vrijednost $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Prosječna vrijednost $f_m$ (MPa)	Prosječna vrijednost $f_c$ (MPa)
1/A	28	2093,47	7,68	36,4	2199	8,4	40,4
2/A	28	2140,56	8,17	41,0			
3/A	28	2155,23	9,61	50,7			
4/A	28	2138,98	8,11	42,2			
5/A	28	2065,97	8,25	31,7			
1/B	28	1989,06	11,41	43,2	2020	10,6	40,9
2/B	28	2015,04	10,38	42,2			
3/B	28	2088,00	12,32	54,0			
4/B	28	2084,45	11,51	39,2			
5/B	28	1922,30	7,45	25,8			
1/C	28	2010,70	10,30	40,5	2034	10,8	44,5
2/C	28	2035,08	9,03	47,2			
3/C	28	2085,23	13,46	54,6			
4/C	28	2079,84	12,54	45,4			
5/C	28	1960,86	8,82	34,7			



Slika 7. Grafikon s prikazanim vrijednostima čvrstoće na savijanje ovisno o njezi uzoraka starih 28 dana

Iz izmjerenih rezultata vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka, koji su bili uzeti s gradilišta, najpovoljnija je njega C – to znači njega morta nakon vađenja iz kalupa u trajanju od 48 sati i nakon toga tretiranje u laboratorijskoj klimi.

Njega uzoraka na takav način dala je prosječno 10 % bolje rezultate i kod tlačnih čvrstoća od njege uzoraka koji su bili stalno u vodi (njega A), odnosno stalno na laboratorijskoj klimi (njega B).

##### 4.2 Kontrola mehaničkih svojstava očvrstnule mješavine cementnog morta s dodatkom polimera na mjestu ugradnje

Na mjestima uzimanja uzoraka izvršeno je i mjerenje vlačne čvrstoće ( $f_t$ ) normiranim *Pull off testom* po normama ISO/DIS 8046 [11] i EN ISO 4024 [12]. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati mjerenja vlačne čvrstoće normiranim *Pull off testom*

Mjesto ispitivanja	Vlačna čvrstoća $f_t$ (MPa)	Opis prijeloma
1	1,10	u betonskoj podlozi
2	3,56	u mortu
3	1,40	u mortu (starost 7 dana)
4	1,51	u mortu (starost 7 dana)
5	1,01	u mortu (starost 7 dana)
6	1,43	u mortu (starost 7 dana)
7	1,77	u mortu (starost 7 dana)
8	2,27	u mortu (slika 7.)
9	1,38	u betonskoj podlozi
10	1,56	u mortu
11	3,03	u mortu
12	2,40	u betonskoj podlozi (slika 8.)
13	2,05	u mortu
14	1,89	u betonskoj podlozi
15	1,10	u betonskoj podlozi
16	2,76	u mortu
17	1,84	u mortu
18	2,32	u mortu
19	1,74	djelomično u mortu, djelomično u betonskoj podlozi (slika 9.)
20	1,84	u mortu
21	2,54	u mortu
22	5,54	u mortu

Uz pridržavanje kriterija kvalitete odnosno minimalne dopuštene vlačne čvrstoće reparaturnog morta (1,5 MPa) vidimo da je kriterij kvalitete ispunjen, osim:

- na mjestima gdje nije bila dostignuta odgovarajuća starost reparaturnog morta (mjesto 3., 4., 5., 6. i 7.) i
- na mjestima gdje je došlo do odlamanja u betonu zbog slabe kvalitete postojećeg betona (mjesto 1., 9. i 15.).

Karakteristične prijelomne površine prikazane su na slikama 8., 9., i 10.

Na mjestima ispitivanja 1., 9. i 15., gdje su izmjerene male vrijednosti vlačne čvrstoće metodom *Pull off* i prijelom u betonskoj podlozi, naknadno je obavljeno uzimanje uzoraka betona plašta dimnjaka. Ispitivanjem tlačne čvrstoće betona utvrđene su vrlo male vrijednosti - od 20,8 do 22,6 MPa. Prema našem je mišljenju, razlog takvih rezultata slaba kvaliteta postojećeg betona.



Slika 8. *Pull off test* – prijelom u mortu



Slika 9. *Pull off test* – prijelom pretežno u betonskoj podlozi



Slika 10. *Pull off test* – prijelom djelomično u mortu, djelomično u betonskoj podlozi

## 5 Kontrola kvalitete morta u laboratoriju

### 5.1 Opis izrade uzoraka

Uzorci svježe mješavine PM-a s maksimalnim zrnim agregata 2 mm pripremljeni su u laboratoriju pri normiranim laboratorijskim uvjetima. Temperatura zraka bila je  $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$  i relativna vlažnost  $55\% \pm 5\%$ . Miješanje predgotovljene mješavine morta s vodom provedeno je laboratorijskom miješalicom za miješanje cementnog tijesta, sukladno zahtjevima norme EN 196-1 [10]. Miješanje mase trajalo je 120 sekundi, a nakon toga slijedilo je vrijeme sazrijevanja morta od 10 minuta i nakon toga ponovno miješanje mase 120 sekundi. Tako pripremljeni mort ugrađen je u kalupe normiranih izmjera 40 x 40 x 160 mm.

Uzorci su 30 sekundi vibrirani na vibracijskom stolu s amplitudom vibriranja 0,7 mm i frekvencijom 50 Hz.

Uzorci su razdijeljeni u tri serije ovisno o njezi (njega A, B i C). Njega uzoraka bila je ista kao što je opisano u poglavlju 4.2.

### 5.2 Mjerenja na uzorcima

U vremenskim su intervalima od 7, 14 i 28 dana izmjereni:

- sadržaj vlage
- obujamska masa ( $\rho$ )

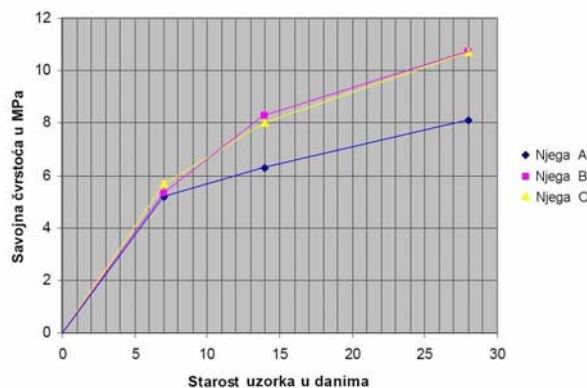
Tablica 3. Rezultati ispitivanja na uzorcima, koji su pripremljeni u laboratoriju

Uzorak	Starost (dana)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Sadržaj vlage % (m/m)	$f_m$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	Prosječne vrijednosti		
						$\rho$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$f_c$ (MPa)
A	7	2043,08	14,57	4,94	21,9	2037	5,2	26,1
A	7	2097,73	-	5,68	34,4			
A	7	1971,29	-	5,05	22,1			
B	7	1970,04	10,50	5,22	26,9	1974	5,3	28,7
B	7	2088,63	-	5,07	35,3			
B	7	1864,41	-	5,63	23,8			
C	7	1958,95	10,98	4,82	27,8	1977	5,7	30,9
C	7	2092,69	-	6,44	39,1			
C	7	1879,73	-	5,97	25,7			
A	14	2097,19	13,72	5,47	30,4	2085	6,3	32,5
A	14	2079,57	-	7,03	29,4			
A	14	2078,24	-	6,41	37,7			
B	14	2032,62	9,56	7,86	35,4	2017	8,3	36,7
B	14	2031,52	-	7,87	35,3			
B	14	1985,63	-	9,25	39,5			
C	14	2029,96	9,64	7,84	36,6	2015	8,0	38,7
C	14	1985,89	-	7,78	36,3			
C	14	2030,50	-	8,33	43,3			
A	28	2232,85	7,01	7,93	46,5	2207	8,1	48,8
A	28	2198,95	-	8,47	47,6			
A	28	2191,91	-	7,97	52,3			
B	28	2139,49	6,50	9,29	47,9	2129	10,7	46,9
B	28	2125,23	-	12,18	44,0			
B	28	2122,30	-	10,68	48,9			
C	28	2124,18	6,34	10,91	46,3	2113	10,7	48,0
C	28	2117,97	-	11,26	47,6			
C	28	2096,68	-	10,00	50,0			

- čvrstoća na savijanje ( $f_m$ )
- tlačna čvrstoća ( $f_c$ ) i
- deformiranje pri prijelomu u smjeru djelovanja sile na uzorak ( $\epsilon_z$ ).

U tablici 3. prikazane su vrijednosti:

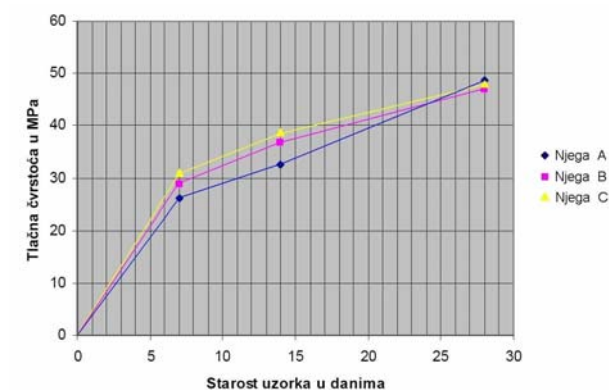
- obujamske mase ( $\rho$ )
- čvrstoće na savijanje ( $f_m$ )
- tlačne čvrstoće ( $f_c$ ) i preračunane prosječne vrijednosti na starost 7, 14 i 28 dana ovisno o vrsti njege (A, B i C).



Slika 11. Grafikon s prikazanim vrijednostima čvrstoće na savijanje ovisno o njezi uzoraka starosti 7, 14 i 28 dana

U tablici 3. i grafikonu na slici 11. prikazani su rezultati čvrstoća na savijanje mjereni 7., 14. i 28. dana ovisno o njezi uzorka tretiranjem A, B i C. Čvrstoća na savijanje prvih 7 dana naglo raste. Maskimalna vrijednost postignuta je na uzorcima s njezom C, najmanja na uzorcima s njezom A. Razlike između čvrstoća na savijanje mjerenih u ovome terminu vrlo su male. Nakon 14 dana stanje se promijeni tako da uzorci s njezom B imaju veću vrijednost čvrstoća na savijanje od uzorka s njezom C, a uzorci s njezom A imaju u prosjeku za 13 % nižu vrijednost čvrstoća na savijanje od uzoraka B odnosno C. Poslije 28 dana prosječna čvrstoća na savijanje na uzorcima s njezom A manja je 32 % od prosječne čvrstoće na savijanje uzoraka B i C.

Sadržaj vlage na uzorcima mjeren je gravimetrijskom metodom u intervalima 7, 14 i 28 dana. Utvrđeno je da uzorci koji su tretirani njezom u vodi (oznaka A) imaju 4 % veći postotak vlage u prvih 14 dana njege od uzoraka koji su bili njegovani u laboratorijskoj klimi (oznaka B i C). Nakon 28 dana postotak vlage neovisno o vrsti njege u uzorcima bitno se ne razlikuje.



Slika 12. Grafikon s prikazanim vrijednostima tlačne čvrstoće ovisno o njezi uzoraka starosti 7, 14 i 28 dana

U kompozitima na osnovi cementa s dodatkom polimera, proces hidratacije počinje odmah i u prvoj fazi dolazi do kristalizacije kalcijeva hidroksida. Kalcijev hidroksid u hidratiziranoj cementnoj pasti prisutan je najvećim dijelom kao kristalizacijska faza. Ovi su kristali masivne heksagonalne pločice koje su dva do tri puta veće od čestica C-S-H [2]. Prema nekim se ispitivanjima ovaj proces završi već u 24 sata. Nakon nekoliko dana u nas-

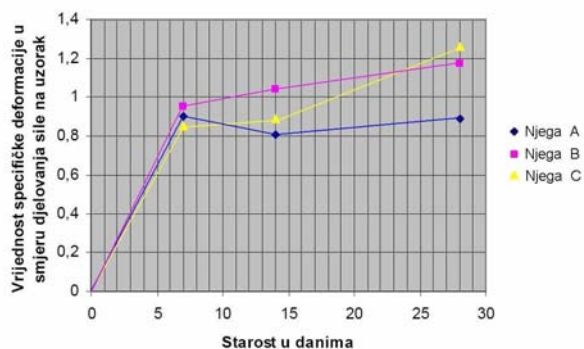
tavku procesa hidratacije može doći do još znatnije kristalizacije kalcijeva hidroksida, što može dovesti i do oslabljenja adhezije između polipropilenskih vlakana i cementne matrice [4].

Na slici 12. prikazan je grafikon rezultata tlačnih čvrstoća iz tablice 3. Izmjerene vrijednosti tlačnih čvrstoća u razdoblju 7 i 14 dana za njegu B i C gotovo su jednake, dok je za njegu A najmanja. Nakon 28 dana neovisno o njezi, vrijednosti tlačnih čvrstoća pogotovo su jednake.

U tablici 4. prikazane su izmjerene prosječne vrijednosti deformacija  $\varepsilon_z$  u trenutku sloma uzorka zbog sile koja je uzrok sloma pri savijanju, a na slici 13. te su vrijednosti prikazane na grafikonu.

Tablica 4. Prosječne vrijednosti deformacija  $\varepsilon_z$  u trenutku sloma uzorka

Uzorak	Starost (dana)	$\varepsilon_z$ [%]
A	7	0,90
B	7	0,95
C	7	0,85
A	14	0,81
B	14	1,04
C	14	0,89
A	28	0,89
B	28	1,17
C	28	1,26

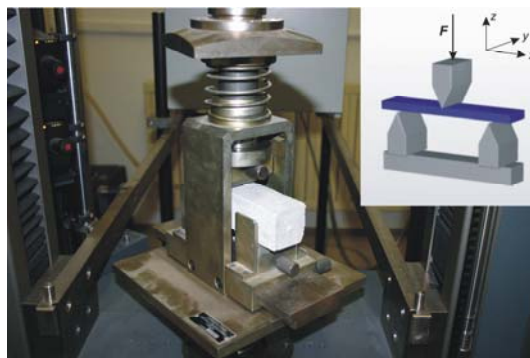


Slika 13. Grafikon s prikazanim rezultatima vrijednosti mjerene deformacije u smjeru djelovanja sile u trenutku sloma

Deformiranje  $\varepsilon_z$  mjerili smo pri ispitivanju čvrstoće uzorka ispitivanog na savijanje prema normi EN 1015-11 [9]. Deformiranje je mjereno u smjeru djelovanja uگیbne sile. Za mjerenje je upotrijebljen univerzalni stroj Zwick/Roel Z010 Materials Testing Machine koji s programskim paketom Test Expert preračunava deformiranje u trenutku sloma. Deformiranja  $\varepsilon_z$  predstavljaju najveće vrijednosti tog parametra koji karakterizira elastična svojstva promatranog materijala. Ispitivanje uzorka morta prikazano je na slici 14. Nakon 7 dana vrijednosti deformiranja  $\varepsilon_z$  na svim uzorcima neovisno o njezi gotovo su jednake. Nakon 14 dana vrijednosti deformiranja  $\varepsilon_z$  najveće su na uzorcima koji su bili negovani po tipu B, a najmanje na uzorcima koji su negovani po tipu A. Potrebno je is-

taknuti i činjenicu da su te vrijednosti na uzorcima koji su negovani po tipu A u ovom razdoblju bitno manje nego li na uzorcima koje smo ispitali nakon 7 dana. Nakon 28 dana najveće vrijednosti deformiranja  $\varepsilon_z$  postignute su na uzorcima s njegom C, a najmanje, prema očekivanju, na uzorcima s njegom A, koje su od vrijednosti izmjerenih na uzorcima C manje čak 41,6 %.

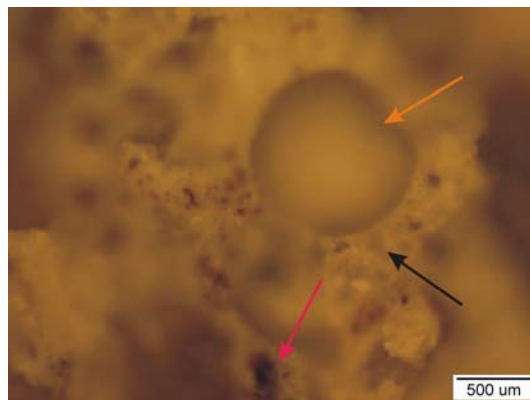
Deformacije  $\varepsilon_z$  karakteriziraju veličinu modula elastičnosti (E) i modula posmika (G). Poznato je da su moduli elastičnosti mortova s dodatkom polimera manji od modula elastičnosti običnih mortova [7]. Veličina modula E i G ozbiljno utječe na deformacije prijelaznog područja kod kompozita u koji su umiješana vlakna. Sudjelovanje mikrovlakana od polipropilena s betonskom matricom u prijelaznom području ovisi o načinu kako se kristali kalcijeva hidroksida vežu s vlaknima [1]. Ako je ova veza dobra, kod sloma obvezatno dolazi do izvlačenja vlakna iz cementne matrice, što je potrebno utvrditi kontrolom mikrostrukture kompozita u području sloma.



Slika 14. Ispitivanje uzorka morta univerzalnim strojem Zwick/Roel Z010

### 5.3 Pregled prijelomnih površina optičkim mikroskopom NIKON EPIPHOT 300

Optičkim smo mikroskopom pregledali površinu prijeloma uzorka nakon ispitivanja za određivanje čvrstoće



Slika 15. Izgled prijelomne površine uzorka izradene optičkim mikroskopom



na savijanje nakon 7 dana njege. Izgled makrostrukture prijelomne površine prikazan je na slici 15.

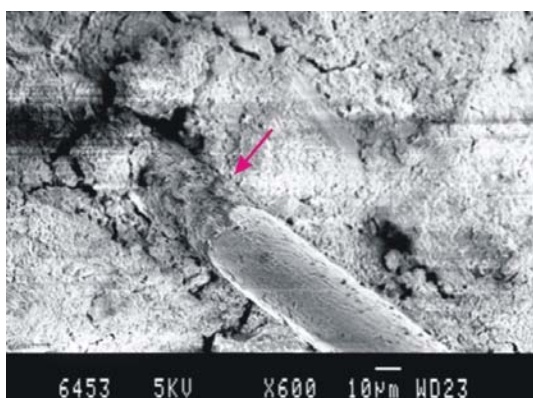
Na prijelomnoj površini uzoraka koji su bili uzeti na gradilištu, a prikazani su na slici 15., vidi se prisutnost zračnih mjehurića (naznačeno narančastom strjelicom) i žilavi prijelom cementnog kompozita po mineralnom agregatu što je naznačeno crnom strjelicom. Zrno mineralnog agregata naznačeno je crvenom strjelicom. Na uzorcima koji su bili pripremljeni u laboratoriju zračne mjehuriće nismo primijetili.

#### 5.4 Pregled prijelomnih površina elektronskim mikroskopom (SEM – Scanning Electron Microscope)

Pregled mikrostrukture prijelomnih površina uzoraka obavljen je na uzorcima koji su bili 7 dana njegovani u uvjetima kao što je to opisano u poglavlju 4.1 – njega A, B odnosno C.

Uzorci su pripremljeni tako da su nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje odlomljeni mali komadići morta. Prijelomna površina koja je nastala zbog savijanja uzorka u vakuumu, presvučenog zlatom. Tako pripremljene uzorke potanko smo analizirali na elektronskom mikroskopu JEOL. Rezultati mikroskopske analize prijelomnih površina prikazani su na fotografijama SEM (slike 16., 17. i 18.).

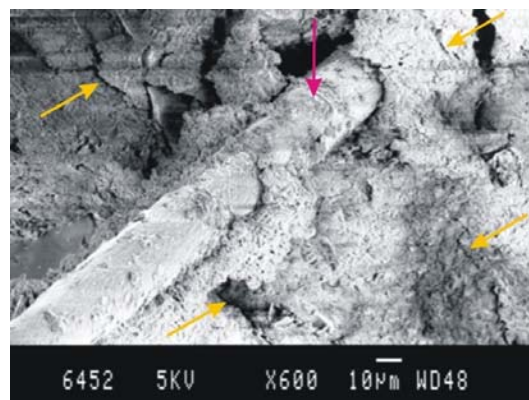
Na uzorku očvrsnule mješavine koji je bio 7 dana njegovan u vodi, prijelom uz vlakno izražen je kao izvlačenje vlakna iz cementne matrice – što naznačuje crvena strjelica na slici 16. Vidi se prijelom u području između cementne matrice i vlakna, što znači da je adhezija između vlakna i cementne matrice jača od kohezije u prethodnom području.



Slika 16. Mikrograf uzorka njega A kod starosti 7 dana

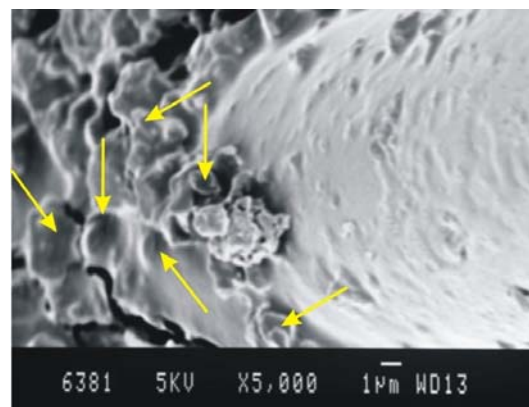
Na uzorku očvrsnule mješavine koji je bio 3 dana njegovan u vodi i sljedeća 4 dana pri normiranoj laboratorijskoj klimi, prijelom uz vlakna izražen je slomom i pukotinama u obliku konusa cementne matrice uz vlakno

(žute strjelice na slici 17.). I u ovome je primjeru došlo do izvlačenja vlakna iz cementne matrice, što naznačuje crvena strjelica.



Slika 17. Mikrograf uzorka njega B kod starosti 7 dana

Na uzorku koji je bio 1 dan njegovan u vodi i sljedećih 6 dana pri normiranoj laboratorijskoj klimi, prijelom uz vlakno izražen je žilavim prijelomom cementne matrice neposredno uz vlakno. U neposrednoj okolini vlakna grupirane su čestice polimera – lateksa u polimernu mrežu, koje su naznačene žutim strjelicama (slika 18.).



Slika 18. Mikrograf uzorka njega C, kod starosti 7 dana

Godinu dana nakon ispitivanja elektronskim mikroskopom JEOL proveli smo dodatna ispitivanja elektronskim mikroskopom QUANTA, koji radi pri malom vakuumu, bez prethodne pripreme uzorka. Analizirali smo prijelomne površine cementne matrice na uzorcima koji su bili njegovani pod uvjetima A, B i C. Poznato je da su betoni s polimerima – naročito s lateksom, u procesu formiranja strukture, što znači očvršćivanja cementne matrice pod utjecajem faze hidratacije i faze polimerizacije. Proces hidratacije odvija se prije faze polimerizacije. U fazi hidratacije se zbog dodatka mikrosilike zapunjava struktura hidratiziranog cementa na temelju dvaju mehanizama:

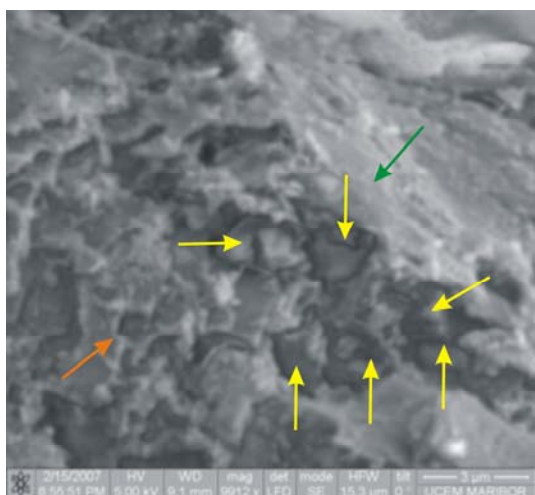
- na mehanizmu zapunjavanja česticama mikrosilike bez reakcije koje zbog svoje male veličine ispunjavaju prostor među česticama i



- mehanizmom C-S-H faze u povećanoj količini, zbog pucolanske reakcije [2].

Proces polimerizacije u betonima, s dodatkom lateksa, odvija se radi formiranja polimernog sloja – mreže u fazi očvršćivanja cementne matrice. Očvršćivanje cementne matrice u konačnu strukturu prolazi kroz više faza. Konačno formirana struktura dobiva se kao rezultat širenja polimernih čestica u međugelske prostore koji postoje u hidratiziranoj cementnoj matrici [3].

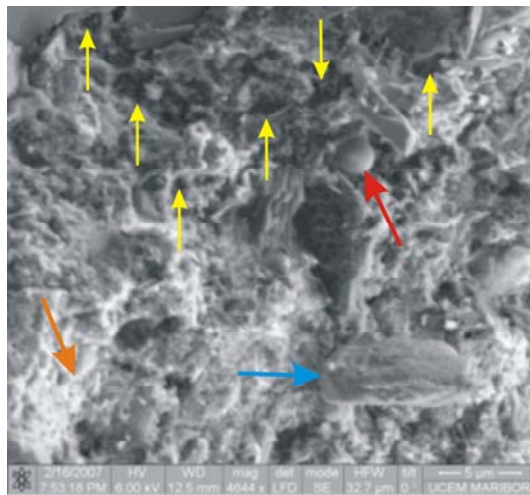
Na slikama 19., 20. i 21. prikazane su mikrostrukture uzoraka ovisno o njezi u trajanju 28 dana nakon godine dana. Mikrostruktura uzorka, koji je bio njegovan 28 dana u vodi i prikazan je na slici 19., ima monolitnu strukturu cementne matrice. Zbog mokre njege, u cementnoj matrici nema nikakvih mikropukotina, ali je raspored čestica lateksa neravnomjeran, grupiran u središtima velike pozornosti cementne matrice, što je naznačeno žutim strjelicama. Zelena strjelica naznačuje plohu prelomljenoga zrna mineralnog agregata a narančasta strjelica utvrđenu amorfnu C-S-H strukturu.



Slika 19. Mikrograf plohe uzorka s njegom A nakon godine dana

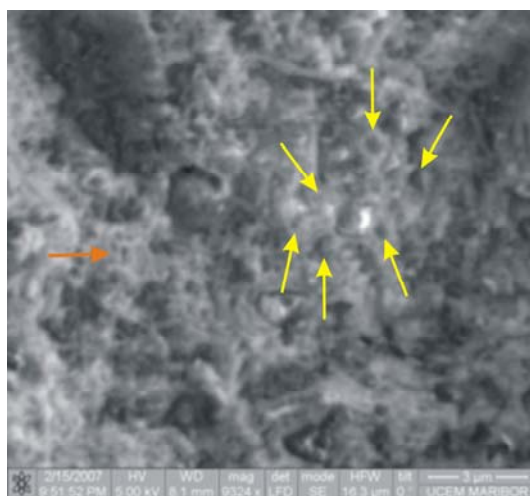
Mikrostruktura uzorka prikazanog na slici 20., koji je bio njegovan po uvjetima B, pokazuje, da je cementna matrica u neposrednoj okolini zrna mineralnog agregata ispunjena neravnomjerno raspoređenim česticama polimera – lateksa koji naznačuju žute strjelice. Ploha hidratizirane cementne matrice vrlo je porozna, ali mikropukotina nema. Utvrđenu amorfnu C-S-H strukturu naznačuje narančasta strjelica. U fazi hidratacije i formiranja strukture cementne matrice formirali su se C-S-H produkti. To su vrlo tanke ljuške i štapićaste čestice  $AF_t$  produkta. C-S-H kristal naznačen je strjelicom plave boje. Konačna struktura cementne matrice nije homogena. Uzrok nehomogenosti vjerojatno je manjak vode u procesu hidratacije. Polimerne čestice nisu raspoređene u okolini polipropilenskog vlakna kao što smo primijetili

na uzorku njege C (slika 18.). Čestica mikrosilike sferičnog oblika naznačena crvenom strjelicom nije izreagirala lateksom odnosno degradirala zbog produkata pucolanske reakcije [5].



Slika 20. Mikrograf plohe u neposrednoj okolini zrna mineralnog agregata uzorka s njegom B nakon godine dana

Na slici 21. prikazan je mikrograf plohe prijelomne površine uzorka koji je bio njegovan pod uvjetima C. Cementna matrica čini homogeni sustav dispergiranih čestica lateksa koje su naznačene žutim strjelicama, mikrosilike i očvršnulog cementnog matriksa. Fine čestice mikrosilike i lateksa ispunile su strukturu između klinkernih minerala. Mikrosilika ima veliku pucolansku aktivnost i strukturu prijelaznog područja između agregata i cementne matrice znatno zgušćuje, što znači i veliku čvrstoću i nižu propusnost [6]. Polimerna disperzija formirana je kao složena matrična struktura. Utvrđena C-S-H struktura koja je naznačena narančastom strjelicom gotovo je potpuno ispunjena i monolitna. Njegom tipa C



Slika 21. Mikrograf plohe uzorka s njegom C nakon godine dana

i dodatkom mikrosilike fazom hidratacije, u kratkom razdoblju dobiva se gusta struktura cementnog kompozita.

## 6 Zaključak

Njega betona i mortova s dodatkom polimera mora biti drukčija od njege običnih cementnih betona. Hidratacija cementa uvjetovana je vlažnom okolinom, dok se kemijska sinteza polimerske supstancije može obavljati samo u suhoj okolini.

Na uzorcima koji su bili u potpunosti njegovani u vodi ustanovili smo pojavu saponifikacije. Početne sedmodnevne čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće uzoraka koji su bili njegovani u vodi primjetno su manje od čvrstoće uzoraka koji su bili njegovani u vodi samo 24 odnosno 72 sata.

Četrnaestdnevne čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće uzoraka također potvrđuju pravilo da je njega mortova s dodatkom polimera u vodi manje primjerena od njege u normiranim laboratorijskim uvjetima.

Kontrola tlačne čvrstoće pokazala je da umiješana polipropilenska vlakna ne utječu bitno na tlačnu čvrstoću kompozita. Dodatak mikrosilike koja popunjava mikropore u hidratiziranom kompozitu umanjuje poroznost i povećava čvrstoću. Dodatak polimera – lateksa i njega na osnovi danih rezultata isto tako ne utječe na konačne vrijednosti tlačne čvrstoće mortova s dodatkom polimera. Pokusi na uzorcima koji su bili izrađeni u laboratoriju to pravilo, pri pregledu konačnih čvrstoća, ne potvrđuju. Na uzorku koji je bio 28 dana njegovan samo u vodi izmjerili smo najveću tlačnu čvrstoću uz primjetno manje vrijednosti čvrstoća na savijanje.

Usporedba rezultata izmjerenih fizikalno-mehaničkih karakteristika uzoraka koji su uzeti na gradilištu s uzorcima koji su izrađeni u laboratoriju potvrđuje pravilo da mokra njega u nizu prvih četrnaest dana može imati i negativne posljedice na mehaničke karakteristike mortova s dodatkom polimera.

Analize i detaljna istraživanja strukture elektronskim mikroskopom QUANTA, koji omogućuje dugotrajna promatranja zbog malog vakuuma na kojem radi, utvrdili smo:

- na čvrstoću očvrstnule cementne matrice morta s dodatkom lateksa uvelike utječe ukupna poroznost i raspodjela pora
- čvrstoća znatno ovisi i o raspodjeli polimera – lateksa koja ovisi o njezi takvih kompozita.

Na osnovi provedene mikroskopske analize mislimo da je postupak miješanja za kvalitetu mortova na osnovi cementa s dodatkom polimera također bitan. Sklonost pjenjenju pojedinih vrsta dodataka uvjetuje izbor posebnih tipova miješalica odnosno postupaka miješanja. Umiješani zrak naime može uvelike povećati poroznost očvrstnuli mortova. Vrlo se često događa da se upotrebom horizontalnih miješalica proizvedu očvrstnuli mortovi manjih čvrstoća, nego kod mortova jednakog sastava proizvedenih miješalicama s većim brzinama miješanja. Poznato je da miješalice koje miješaju većom brzinom umiješaju mnogo manje zraka od običnih miješalica za beton. Ovo tumačenje može objasniti zašto su prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće na gradilištu miješanih mortova prosječno 14 % manje od prosječne tlačne čvrstoće mjerene na uzorcima koji su bili izrađeni u laboratoriju gdje smo se koristili laboratorijskom miješalicom.

Smatramo stoga da je za mortove s dodatkom polimera u obliku lateksa nužna njega u trajanju 70 sati. Na ovaj je način utvrđeno da proces hidratacije nije bitno poremećen zbog nedostatka vode u fazi formiranja strukture morta. Na se ovaj način dolazi do složene strukture, monolitne rešetke s dispergiranim polimerima, koja je nastala prodiranjem polimerne faze kroz strukturu hidratacije. Ovako nastala cementna matrica vrlo dobro povezuje čestice mineralnog agregata u sklopu promatrane mješavine.

## LITERATURA

- [1] Beaudoin, J.: *Handbook of fiber-reinforced concrete*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey U.S.A., 1990.
- [2] Đureković, A.: *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, 1. izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [3] Muravljev, M.; Jevtić, D.: *Građevinski materijali 2*, Akademska misao, Beograd, 2003.
- [4] Ohama, Y.: *Polymer-based admixtures*, Cement and Concrete Composites, Volume 20, Issues 2 – 3, 189 – 212, 1998
- [5] Pascal, S.; Alliche, A.; Pilvin, PH.: *Mechanical behaviour of polymer modified mortars*, Materials Science and Engineering, Volume 380, Issues 1 – 2, 1 – 8, 2004
- [6] Taylor, H.: *Cement chemistry*, 2<sup>nd</sup> edition, Thomas Telford, London, 1997
- [7] Al-Zahrani, M.; Maslehudin, M.; Al-Dulaijan, S.; Ibrahim, M.: *Mechanical properties and durability characteristics of polymer – and cement – based repair materials*, Cement and Concrete Composites, Volume 25, (2003), Issues 4 – 5, 527 - 537,
- [8] EN 12190:2000 *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of compressive strength of repair mortar*
- [9] EN 1015-11:2000 *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*
- [10] EN 196-1:2005 *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*
- [11] ISO/DIS 8046 *Concrete, hardened – Determination of pull – out strength*
- [12] EN ISO 4624:2004 *Paint and varnishes – Pull-off test for adhesion*