

Przyczepność betonopodobnych kompozytów polimerowo-cementowych do podłoża

Adhesion of polymer-cement concretes to the substrate

1. Wprowadzenie

Betony polimerowo-cementowe (PCC – Polymer-Cement Concretes) są szeroko stosowane jako materiały do napraw i ochrony konstrukcji betonowych (1, 2) oraz do wykonywania nawierzchni i posadzek przemysłowych (3). Przez betony polimerowo-cementowe rozumie się dużą grupę kompozytów budowlanych o wypełniaczu ziarnistym, przy czym zazwyczaj zalicza się do niej także materiały, w których średnica ziaren kruszywa nie przekracza wielkości typowej dla zapraw budowlanych; uzasadnieniem są ich właściwości, w wielu przypadkach nie odbiegające od cech charakterystycznych dla betonu (4). Zmiana właściwości betonu w wyniku dodatku polimeru pozwala na poprawę wielu właściwości: wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, odporności na ścieranie, małej przepuszczalności dla cieczy i gazów oraz - co jest szczególnie ważne w wyżej wymienionych zastosowaniach - przyczepności do różnego rodzaju podłoży. Poprawa przyczepności była jedną z pierwszych zaobserwowanych i udokumentowanych właściwości materiałów PCC (5, 6), w dużej mierze przesądzającą o ich technicznej atrakcyjności.

Beton polimerowo-cementowy to materiał zawierający większy od 5% dodatek polimeru w stosunku do masy cementu. Dodatek polimeru mniejszy niż 5% masy cementu określa się jako domieszkę (7). W tworzywie polimerowo-cementowym polimer tworzy ciągłą strukturę przestrzenną w twardniejącym materiale. Polimer i produkty hydratacji cementu tworzą dwie przenikające się i współdziałające matryce (8).

2. Rodzaje polimerów

Do wytwarzania kompozytów stosuje się wiele polimerów, różniących się zarówno budową chemiczną, jak i postacią, w jakiej są wprowadzane do mieszanki betonowej. Można tu wyróżnić (1, 9):

- Dyspersje wodne polimerów: lateksy syntetycznych kauczuków (zwłaszcza butadienowo-styrenowego – SBR), emulsje żywic wodorozcieńczalnych (zwłaszcza epoksydowych) i dyspersje innych polimerów termoplastycznych (poliakrylanów – PAE, kopolimerów styrenowo-akrylowych – SA, kopolimerów etylenowo-winylowych – EVA i innych).
- Wodne roztwory polimerów (zwłaszcza polialkoholu winylowego – PVA).
- Polimery stałe (proszki redyspergowalne).
- Ciekłe żywice syntetyczne (głównie epoksydowe).

Ze względu na sposób działania rozróżnia się następujące rodzaje polimerów (10):

1. Introduction

Polymer-cement concretes (PCC) are widely used as materials for repair and protection of concrete structures (1, 2) as well as for overlays and industrial floors (3). Polymer-cement concretes are a large group of building composites with the granular filler. The materials belong to mortars according to the diameter of the aggregate grains are usually counted into PCC, too. This is justified by their properties, in many cases similar to those of concrete (4). The modification of concrete with polymers improves many of its features: tensile and flexural strength, abrasion resistance, tightness and – particularly important for the above mentioned applications – adhesion to various substrates. The improvement of adhesion was one of the first observed and described properties of PCC materials (5, 6), determining of their technical attractiveness.

Polymer-cement concrete is the material containing more than 5% of polymer additive, by cement mass. The smaller amount of the polymer is called admixture (7). In the case of polymer-cement concrete, the continuous, three-dimensional network is formed by the polymer in the hardened material. The polymer and cement hydration products create two interpenetrating matrices (8).

2. Types of polymers

A large number of polymers is used to make composites. They are differentiated by their chemical constitution and by the form in which they are introduced into the concrete mix. The following types of polymers can be listed here (1, 9):

- Water dispersions of polymers: synthetic rubbers latexes (particularly the styrene-butadiene rubber – SBR), emulsions of water-soluble resins (particularly epoxy resins – EP) and dispersions of other thermoplastic polymers (polyacrylates - PAE, styrene-acrylic co-polymers – SA, ethylene-vinyl co-polymers – EVA, and others).
- Water solutions of polymers (particularly polyvinyl alcohol – PVA).
- Solid polymers (re-dispersible powders).
- Liquid synthetic resins (mainly epoxy ones – EP).

According to the way of operation, the polymers can be categorized as follows (10):

- Pre-mix (chemically inactive polymers, one-component); they are usually latexes or solid polymers. Forming of the continuous polymer layer is the effect of physico-chemical processes - coalescence of the polymer particles.

- Pre-mix (polimery nieaktywne chemicznie, jednoskładnikowe); są to zazwyczaj lateksy lub polimery proszkowe. Tworzenie ciągłej warstwy polimerowej, modyfikującej właściwości spoiwa, następuje w wyniku procesów fizykochemicznych - łączenia się (koalescencji) cząstek polimeru.
- Post-mix (polimery aktywne chemicznie; zazwyczaj dwuskładnikowe); są to żywice utwardzalne, ciekłe lub w postaci emulsji wodnych. Ciągła warstwa polimeru powstaje na skutek ich utwardzania (sieciovania), przebiegającego równocześnie z hydratacją cementu.

3. Przyczepność spoiwa polimerowo-cementowego do podłoża

Korzystna modyfikacja mikrostruktury zaczynu polimerowo-cementowego wynika przede wszystkim z następujących zmian:

- utworzenia ciągłej błony polimeru przenikającej matrycę cementową (11),
- zmiany pokroju kryształów w utwardzonym spoiwie cementowym (12, 13),
- zmniejszenia ilości wody zarobowej, a w efekcie porowatości betonu (14, 15).

Obecność polimeru wpływa też korzystnie na budowę warstwy kontaktowej zaczynu cementowego z kruszywem. Strefa ta w betonie zwykłym jest bardziej porowata i zawiera mniej hydratów, niż pozostały zaczyn, dlatego uważana jest za najsłabsze miejsce w betonie (16). W przypadku betonu polimerowo-cementowego, przestrzeń między ziarnami cementu jest wypełniana przez polimer. Zwiększa to powierzchnię kontaktu matrycy cementowo-polimerowej z kruszywem i powoduje znaczne zagęszczenie warstwy kontaktowej z kruszywem (17). W efekcie jej właściwości ulegają znacznej poprawie w porównaniu z betonem bez polimeru. Charakterystyczna jest także zdolność polimeru do mostkowania mikrorys (18) pojawiających się w stwardniałym zaczynie cementowym (rysunek 1).

4. Wpływ polimeru na przyczepność zaprawy do podłoża

W Laboratorium Budowlanych Kompozytów Polimerowych Politechniki Warszawskiej prowadzone są badania skuteczności dodatku różnych polimerów stosowanych w kompozytach budowlanych. W badaniach przyczepności ilość dodawanego polimeru wynosiła od 0% do 20% w stosunku do masy cementu. Przygotowywano mieszanki zapraw o stałej konsystencji, odpowiadającej zaprawie cementowej według normy PN-EN 196-1:1996 (19). Przyczepność badanych zapraw do betonu o klasie wytrzymałości na ściskanie C 25/30 określono za pomocą próby odrywania („pull-off”) wg PN-EN 1542 (20).

Wyniki badań wykazują, że dodatek polimeru stosowanego zarówno w metodzie pre-mix, jak i post-mix, może poprawiać przyczepność kompozytów do podłoża betonowego. Przy zawartości polimeru wynoszącej 15% w stosunku do masy cementu najkorzystniejsze wyniki uzyskano w przypadku dodatku dyspersji poliakrylanów (tablica 1). Także inne właściwości kompozytów uległy poprawie pod wpływem tego dodatku (tablica 2).

Zazwyczaj przyczepność kompozytu rośnie wraz z zawartością polimeru w badanym zakresie, jednak w przypadku polialkoholu winylowego sytuacja jest odwrotna (rysunek 2); można oczeki-

- Post-mix (chemically active polymers; usually two-component); they are chemosetting resins, liquid or in the form of the water emulsions. Forming of the continuous polymer layer is the effect of hardening of the resin, proceeding simultaneously with the cement hydration.

3. Adhesion of polymer-cement binder to the substrate

The favourable modification of the microstructure of the polymer-cement paste is the result of following modifications:

- forming the continuous polymer layer, penetrating into the cement matrix (11),
- change of the crystals shape and size in the hardened cement binder (12, 13),
- decreasing of the amount of the mixing water, leading to the diminishing of the pores volume in the concrete (14, 15).

The structure of the transition zone between the cement paste and the aggregate is also affected by polymer in a favorable way. In the Portland cement concrete whose zone is more porous and contains less hydrate than the rest of the cement paste; for this reason it is assumed to be the weakest place of the concrete (16). In polymer-cement concrete, the space between cement grains is filled with polymer. This increases the area of contact between polymer-cement matrix and aggregate as well as significantly condensing the the transition zone with the aggregate (17). As a result, the properties of the transition zone are improved. Polymer is also able to bridging the microcracks (18) in the hardened cement paste (Fig. 1)



Rys. 1. Mostkowanie mikrorysy w zaczynie cementowym przez polimer; SEM 800x.

Fig. 1. Bridging of the microcrack in the hardened cement paste by the polymer; SEM 800x.

wać maksimum przyczepności przy zawartości polimeru mniejszej od 15%. Jest to zgodne z doniesieniami literaturowymi, w których zaleca się stosowanie tego polimeru w małych ilościach (21). Polialkohol winylowy stosuje się w postaci proszku rozpuszczalnego w wodzie, co stanowi wielką zaletę technologiczną (łatwość dodawania do mieszanki betonowej – jako element suchych mieszanek zapraw typu „ready-mix” lub z wodą zarobową w miejscu zastosowania).

Duże znaczenie mają także niewielkie zmiany przyczepności kompozytów polimerowo-cementowych do podłoża (rysunek 3), w tym także w warunkach wieloletniego oddziaływania czynników atmosferycznych (22). Zakrojone na szeroką skalę badania w tym zakresie przeprowadził Y. Ohama (23); pod działaniem zmiennego klimatu (wielokrotne zmiany temperatury z dodatniej na ujemną) połączenie zaprawy bez dodatku polimeru z podłożem mineralnym uległo całkowitemu zniszczeniu w ciągu jednego roku, natomiast adhezja zaprawy polimerowo-cementowej zawierającej poliakrylany pozostała na poziomie przekraczającym 50% wartości pierwotnej, nawet po dziesięciu latach.

Poprawa przyczepności dotyczy nie tylko podłoża betonowego, ale także wielu innych rodzajów materiałów; szczególnie cenne jest zwiększenie przyczepności do stali zbrojeniowej (8, 24), zaznaczające się wyraźnie (rysunek 4) w przypadku większych zawartości polimeru (PAE).

Dodatek polimeru, dzięki zwiększeniu elastyczności kompozytu, poprawia także jego przyczepność do tak zwanych „trudnych” podłoży - na przykład do płytek ceramicznych mocowanych do podłoży odkształcalnych, do których należą płyty drewnopochodne lub gipsowo-kartonowe (26). Według niektórych autorów, przyczepność może w takim przypadku wzrosnąć nawet sześciokrotnie (6).

Przyczyny poprawy przyczepności kompozytów polimerowo-cementowych do różnych podłoży nie jest w pełni wyjaśniony. Najczęściej tłumaczy się go utworzeniem zwiększającej adhezję warstewki polimerowej na granicy kontaktu zaprawy z podłożem, zarówno w przypadku podłoża mineralnego (27), jak i stali zbrojeniowej (25). Hipotezę tę potwierdzają wyniki badań wykazują-

Tablica 1 / Table 1

PRZYPNOSP DO PODŁOŻA BETONOWEGO WYBRANYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWO-CEMENTOWYCH (ZAWARTOSP POLIMERU = 15% MASY CEMENTU)
ADHESION OF SELECTED POLYMER-CEMENT CONCRETES TO THE CONCRETE SUBSTRATE (AMOUNT OF POLYMER = 15% OF CEMENT MASS)

Polimer Polymer	Przyczepność do podłoża, MPa Adhesion to the substrate, MPa	
	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation
polialkohol winylowy (PVA) polyvinyl alcohol (PVA)	1,8	0,3
estry poliakrylowe (PAE) polyacrylates (PAE)	2,7	0,3
kopolimer styrenowo-akrylowy (SA) styrene-acrylic co-polymer (SA)	1,7	0,2
żywica epoksydowa (EP) epoxy resin (EP)	1,6	0,2
zaprawa normowa non-modified composite	1,3	0,2

4. Influence of polymer on cement mortar adhesion to the substrate

The research on effectiveness of various polymers addition for concrete are performed in the Laboratory of Building Polymer Composites of Warsaw University of Technology. Adhesion to the substrate has been tested for the composites containing up to 20% of polymer of cement mass. Concrete mixes of standard workability according to PN-EN 196-1:1996 (19) have been prepared. Adhesion of the PCC materials to the concrete of the compressive strength class C 25/30 has been tested by pull-off method according to PN-EN 1542 (20).

The tests results show that adhesion of the PCC composites to the concrete substrate can be improved using both pre-mix and post-mix polymer. The maximum adhesion has been obtained for 15% of the addition of acrylic dispersion to cement mass (Table 1). Also, other properties of the polymer-cement concretes have been improved (Table 2).

Adhesion of the composite increases usually with the amount of polymer, yet in the case of polyvinyl alcohol the situation is oppo-

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI WYBRANYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWO-CEMENTOWYCH (ZAWARTOSP POLIMERU = 15% MASY CEMENTU)
PROPERTIES OF SELECTED POLYMER-CEMENT CONCRETES (AMOUNT OF POLYMER = 15% OF CEMENT MASS)

Polimer Polymer	Właściwość/Property					
	Wytrzymałość na zginanie, MPa Flexural strength, MPa		Wytrzymałość na ściskanie, MPa Compressive strength, MPa		Nasiąkliwość, % Water absorbability, %	
	Wartość średnia Mean value	Odch. stand. Stand. dev.	Wartość średnia Mean value	Odch. stand. Stand. dev.	Wartość średnia Mean value	Odch. stand. Stand. dev.
polialkohol winylowy (PVA) polyvinyl alcohol (PVA)	7,5	0,3	24,3	2,4	5,0	0,2
estry poliakrylowe (PAE) polyacrylates (PAE)	10,0	0,3	32,6	1,5	2,6	0,3
kopolimer styrenowo-akrylowy (SA) styrene-acrylic co-polymer (SA)	10,0	0,3	18,7	1,1	3,4	0,3
żywica epoksydowa (EP) epoxy resin (EP)	7,4	0,3	35,3	1,1	3,3	0,3
zaprawa normowa non-modified composite	7,0	0,5	30,6	1,4	6,8	0,1

ce, że podobny wynik uzyskuje się często przy zastosowaniu gruntowania podłoża roztworem polimeru przed nałożeniem warstwy kompozytu cementowego lub cementowo-wapiennego (28).

Pozostaje kwestią dyskusyjną, czy poprawa przyczepności kompozytów polimerowo-cementowych do podłoża jest w większym stopniu uwarunkowana rodzajem stosowanego polimeru, czy też jego ilością (8, 29). Nie ulega wątpliwości, że oba te czynniki odgrywają ważną rolę, przy czym zdaniem niektórych badaczy większe znaczenie ma rodzaj polimeru (25, 30), inni zaś większe znaczenie przypisują jego zawartości (31, 32). Poprawa przyczepności jest w zasadzie proporcjonalna do zawartości polimeru, choć w niektórych badaniach stwierdza się występowanie optimum jego dodatku przy większych zawartościach – między 50% a 55% w stosunku do masy cementu (33). Nie wpływa natomiast na działanie polimeru postać, w jakiej jest on wprowadzany; poprawę przyczepności uzyskuje się zarówno dodając polimer przed zmieszaniem cementu z wodą (metoda pre-mix) jak i po zmieszaniu (metoda post-mix), zarówno w przypadku stosowania ciekłych żywic, jak i dyspersji polimerowych oraz proszków redyspergowalnych (34, 35).

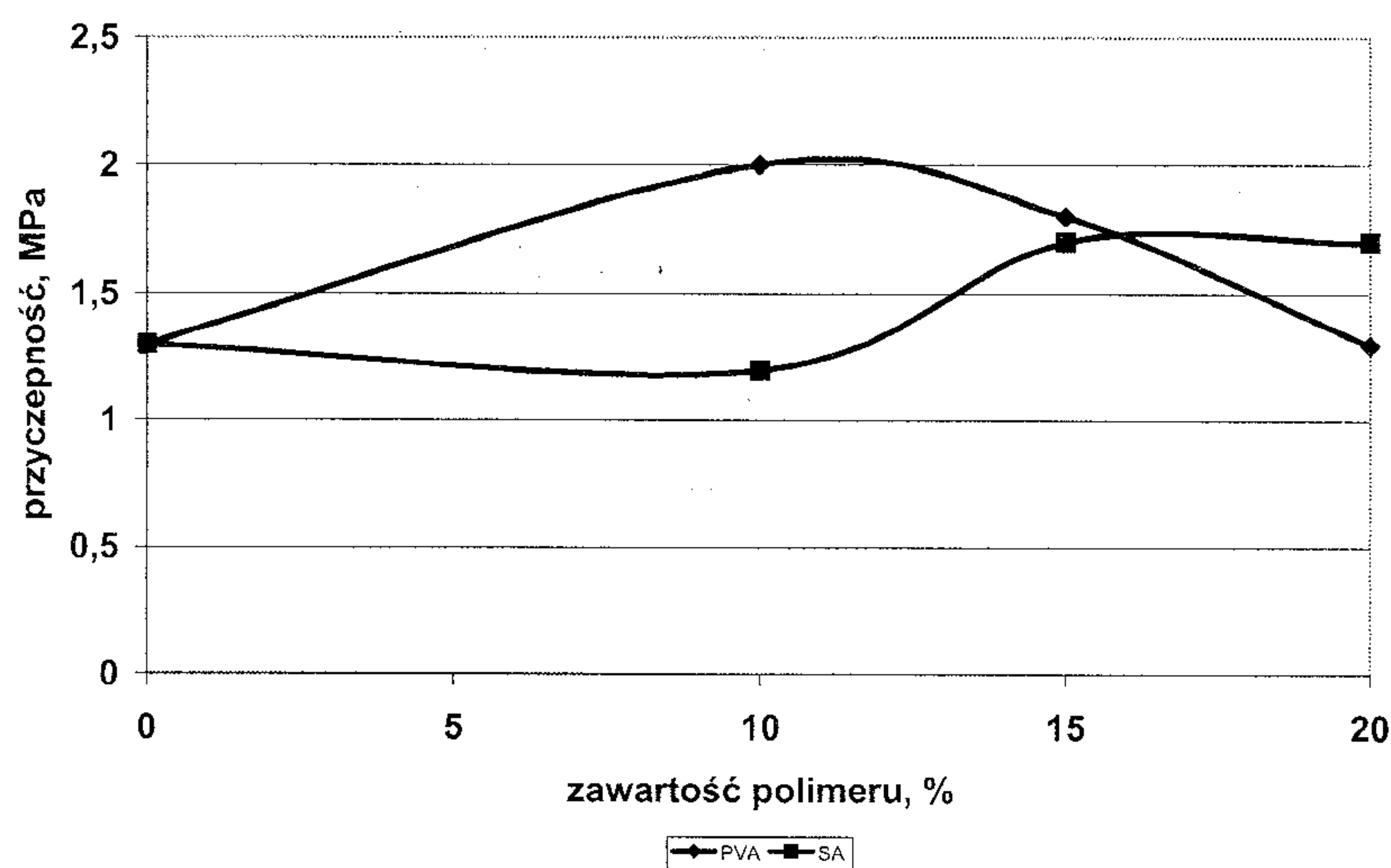
Niektórzy autorzy (36) wiążą stopień poprawy przyczepności z odpornością polimeru na działanie wody: im mniejsza nasiąkliwość spoiwa cementowo-polimerowego, tym większa przyczepność. Stąd można by się spodziewać większej przyczepności do podłoża kompozytów zawierających poliakrylany (PAE), mniejszej w przypadku dodatku kauczuku styrenowo-butadienowego (SBR), najmniejszej zaś w przypadku polipropionianu winylu (PVP), jednak nie wszystkie wyniki badań potwierdzają tę hipotezę (37, 38).

Na przyczepność do podłoża mineralnego, oprócz rodzaju i zawartości polimeru w kompozycie PCC, wpływają także inne czynniki, w tym zwłaszcza stan podłoża. Jako decydujący czynnik uznaje się zawilgocenie; podłoże zbyt suche może absorbować wodę z nakładanej warstwy i utrudniać w ten sposób hydratację spoiwa cementowego, z kolei jeśli podłoże jest zbyt wilgotne, wilgoć może migrować do nakładanego kompozytu polimerowo-cementowego utrudniając wykształcenie się współmatrycy polimerowej (39). Odpowiedni zakres wilgotności podłoża jest dość szeroki – szacuje się, że może on się zawierać między 50% a 75%, a nawet wynosić 90% całkowitego nasycenia (40).

5. Podsumowanie

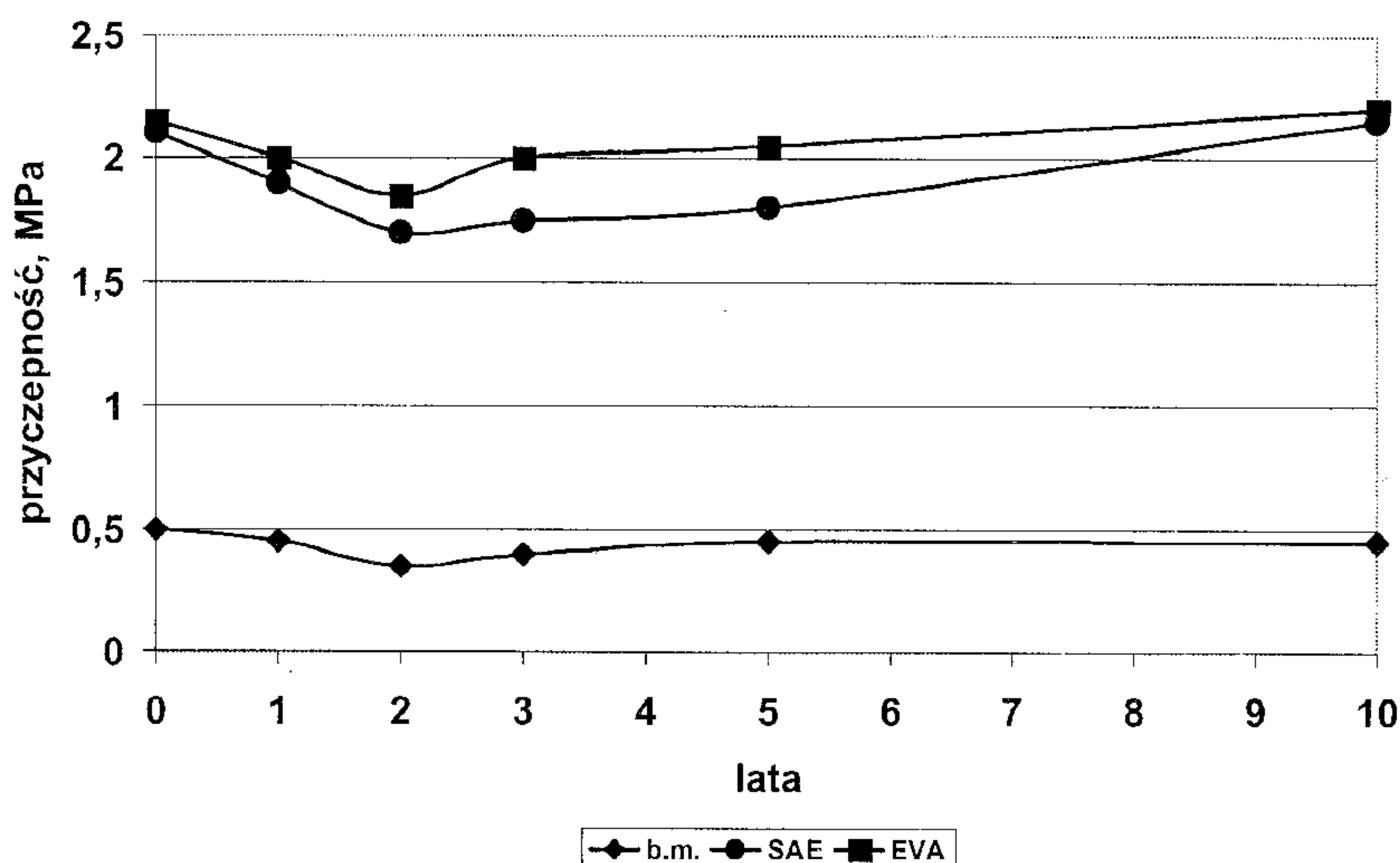
Dodatek polimerów może poprawiać znacznie przyczepność kompozytów budowlanych do podłoża, pod warunkiem odpowiedniego doboru polimeru pod względem jakościowym i ilościowym. Wynika to – podobnie jak w przypadku innych właściwości – z obecności w materiale dwóch przenikających się i współdziałających spoiw: mineralnego i polimerowego. Rodzaj polimeru (pre-mix, post-mix) nie jest czynnikiem decydującym o skuteczności jego działania; dobre wyniki można uzyskać w obu przypadkach.

Kompozyty polimerowo-cementowe stanowią bardzo obiecujący kierunek rozwoju inżynierii materiałów budowlanych, wciąż jednak istnieje tu wiele problemów nierozstrzygniętych lub wymaga-



Rys. 2. Przyczepność do podłoża kompozytów zawierających dodatek kopolimeru styrenowo-akrylowego (SA) i polialkoholu winylowego (PVA).

Fig. 2. Adhesion of polymer-cement concretes with addition of styrene-acrylic copolymer (SA) and polyvinyl alcohol (PVA) to the substrate.



Rys. 3. Przyczepność zapraw polimerowo-cementowych do podłoża mineralnego w warunkach laboratoryjnych. Dodatki: EVA – kopolimer octanu winylu z etylenem, SAE – kopolimer styrenowo-akrylowy, b.m. – zaprawa bez dodatku; p/c = 0,13 (22).

Fig. 3. Adhesion of polymer-cement mortars to the mineral substrate in the laboratory conditions. Additives: EVA – ethylene-vinyl acetate co-polymer, SAE – styrene-acrylic co-polymer, b.m. – mortar without additive; p/c = 0.13 (22).

site (Fig. 2). Maximum adhesion can be expected at the polymer amount below 15%. This is conforming to the literature data in which the use of PVA in small amount is recommended (21). Polyvinyl alcohol is the water-soluble powder, which is a significant technological advantage (easy addition to the concrete mix – as the part of ready-mix mortars or on site with mixing water).

Durability of adhesion of polymer-cement concretes to the substrate has also been considerably improved (Fig. 3), including heavy-duty conditions, like many years of natural weathering (22). The wide research programme in this range was carried out by Y. Ohama (23); the bond between tested composite and mineral substrate was exposed to the repeated crossing of temperature 0°C. In the case of non-modified Portland cement mortar the bond was totally disintegrated within one year while adhesion of acrylic-cement mortar remained above 50% of the initial value even after ten years.

The improvement of adhesion is observed not only in the case of

jących pełniejszego zbadania. Do obszarów szczególnego zainteresowania, zwłaszcza w aspekcie praktycznym, można zaliczyć:

- wprowadzanie nowych rodzajów polimerów, zwłaszcza kopolimerów,
- stosowanie metod pozwalających na uproszczenie procesów technologicznych, np. żywicy epoksydowej bez utwardzacza lub polimerów proszkowych wstępnie mieszanych z cementem,
- wyjaśnienie wpływu polimeru na właściwości materiałów zbrojonych włóknami, doskonalenie metod projektowania materiałowego kompozytów PCC.

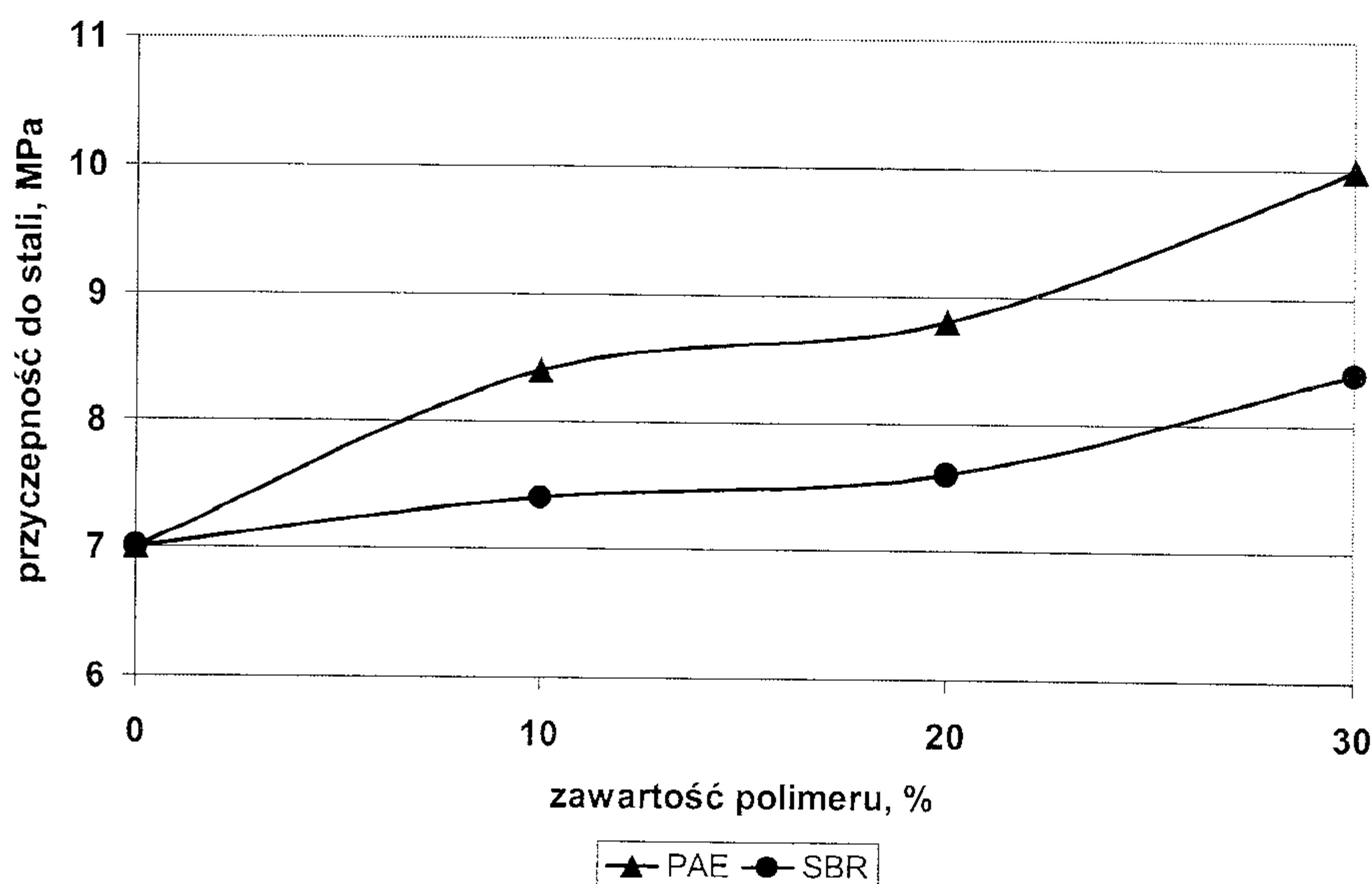
Podziękowanie

Autor dziękuje Panu prof. dr hab. inż. Lechowi Czarnieckiemu za cenne wskazówki i dyskusje w czasie przygotowywania pracy.

Praca finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych jako projekt badawczy nr 4 T07E 007 26. Literatura

Literatura / References

1. Guide for the use of polymers in concrete, report of ACI Committee 548. Journal of the American Concrete Institute, 9-10, 798 (1986).
2. G.W. DePuy, 8th Int. Congress on Polymers in Concrete, Oostende 1995, 381-388.
3. L. Czarniecki, Z. Rydz, Materiały Budowlane, 9, 2-6 (2000).
4. L. Czarniecki, Betony żywiczne, Arkady, Warszawa 1982.
5. J. T. Dikeou, 1st Int. Congress on Polymers in Concrete, London 1975, 2-8.
6. H. Teichmann, 1st Int. Congress on Polymers in Concrete, London 1975, 112-124.
7. PN-EN 934-2: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie
8. N.F.O. Evbuomwan, 6th Int. Congress on Polymers in Concrete, Shanghai 1990, 52-59.
9. Y. Ohama: Handbook of polymer-modified concrete and mortars; properties and process technology. Noyes Publications, Park Ridge 1995.
10. L. Czarniecki, International Seminar "Durability of concrete. Aspects of admixtures and industrial by-products", Göteborg 1986, 191-222.
11. L. Czarniecki, P. Łukowski, Cement Wapno Beton, 6, 300-309 (2003)
12. F. Shaker, A. El-Dieb, M. Reda, Cement and Concrete Research, 27, 711-720 (1997).
13. M. Afridi, Y. Ohama, Z. Iqbal, K. Demura, Cement and Concrete Composites, 12, 163-173 (1990).
14. Y. Ohama, K. Demura, K. Kobayashi, Y. Satoh, M. Morikawa, Cement and Concrete Research, 2-3, 309-315 (1991).
15. L. Czarniecki, S. Grzeszczyk, P. Łukowski, Int. Colloquium "Advances in Cement Chemistry", (ed. W. Kurdowski), Mogilany 1997, 117-132.
16. A.M. Neville, Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
17. Y. Ohama, ACI Materials Journal 11-12, 511-518 (1987).
18. H. Schorn, M. Butler, S. Hempel, 11th International Congress on Polymers in Concrete, Berlin 2004, 11-18.
19. PN-EN 196-1:1996: Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości.



Rys. 4. Przyczepność zapraw polimerowo-cementowych do stali zbrojeniowej. Polimery: PAE – dyspersja poliakrylanów, SBR – lateks kauczuku styrenowo-butadienowego (25).

Fig. 4. Adhesion of polymer-cement concretes to reinforcing steel. Polymers: PAE – polyacrylates dispersion, SBR – styrene-butadiene rubber (25).

the concrete substrate, but also for many other types of materials; particularly valuable is increasing of adhesion to the reinforcing steel (8, 24), demonstrated (Fig. 4) for larger amounts of polymer (PAE).

The polymer additive also improves adhesion to the „difficult” substrates – for instance to the ceramic tiles fixed to the deformable substrates (timber-like panels, gypsum-cardboard plates, etc.) (26). According to some authors, adhesion in such cases can increase even six times (6).

The causes of improvement of adhesion of polymer-cement concretes to the various substrates are not fully recognised. Most often, it is explained by forming the polymer film on the boundary between bonded material and the substrate; this increases adhesion in the case of mineral substrate (27) as well as reinforcing steel (25). This hypothesis is confirmed by the results of tests in which a similar improving effect is obtained by using polymer solution or dispersion before the cement or cement-lime composite is applied (28).

The open question is if improvement of adhesion of polymer-cement concretes to the substrate depends mainly on the type of polymer used or on its amount (8, 29). There is no doubt that both of these factors are very important. However, some of researchers claim the polymer type as the key factor (25, 30) while others vote for the volume (31, 32). In general, the improvement of adhesion is proportional to the polymer amount, although in some research the optimum of adhesion is found at the larger polymer volume – between 50% and 55% by cement mass (33). The polymer's action are not influenced by the form in which polymer is introduced into the concrete mix; the improvement of adhesion can be achieved using polymer before mixing cement with water (the pre-mix method) as well as after mixing (the post-mix method), liquid resin as well as polymer dispersion and re-dispersible powders (34, 35).

Some authors (36) attribute the degree of adhesion improvement to the water-resistance of the polymer: the less absorbability of cement-polymer binder, the higher adhesion. Thus, the highest adhesion could be expected for the concretes contain polyacrylates (PAE), lower for styrene-butadiene rubber (SBR) addition, and

20. PN-EN 1542:2000: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie.
21. E. Knapen, A. Beeldens, D. Van Gemert, F. Van Rickstal, 11th International Congress on Polymers in Concrete, Berlin 2004, 83-90.
22. J. Schulze, O. Killermann, Cement and Concrete Research 31, 357-362 (2001).
23. Y. Ohama, 3rd Int. Congress on Polymers in Concrete, Koriyama 1981, 209-221.
24. T. Muhua, Z. Wen, W. Keru, H. Yiun-Yuan, 5th Int. Congress on Polymers in Concrete, Brighton 1987, 215-218.
25. M. Reda, 10th Int. Congress on Polymers in Concrete, Hawaii 2001.
26. H.F. Zoumut, ASTM Special Technical Publication STP 1176: "Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures" (eds. Louis A. Kuhlmann and D. Gerry Walters), ASTM, Philadelphia-Fredericksburg, 1993, 19-33.
27. E. Sakai, J. Sugita, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, 127-135 (1995).
28. M. Puterman, A. Bentur, I. Soroka, 6th Int. Congress on Polymers in Concrete, Shanghai 1990, 288-291.
29. R.P. Bright, T.J. Mraz, J.C. Vasallo, ASTM Special Technical Publication STP 1176: "Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures" (eds. Louis A. Kuhlmann and D. Gerry Walters), ASTM, Philadelphia-Fredericksburg 1993, 44-62.
30. S. Popovics, 7th Int. Congress on Polymers in Concrete, Moscow 1992, 100-107.
31. R.N. Swamy, 8th Int. Congress on Polymers in Concrete, Oostende 1995, 21-26.
32. K.S. Yeon, Y.S. Lee, K.Y. Ji, 2nd Int. RILEM Symposium ISAP '99 "Adhesion between Polymers and Concrete", Dresden 1999, 339-347.
33. H. Kamimoto, M. Wakasugi, ASTM Special Technical Publication STP 1176: "Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures" (eds. Louis A. Kuhlmann and D. Gerry Walters), ASTM, Philadelphia-Fredericksburg 1993, 34-43.
34. S.I. Schneider, D.R. DeWacker, J.G. Palmer, ASTM Special Technical Publication STP 1176: "Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures" (eds. Louis A. Kuhlmann and D. Gerry Walters), ASTM, Philadelphia-Fredericksburg 1993, 76-89.
35. T. Yamamoto, K. Osaki, M. Wakasugi, A. Sugiura, H. Sakakibara, 9th Int. Congress on Polymers in Concrete, Bologna 1998, 255-261.
36. T.A. Bürge, 5th Int. Congress on Polymers in Concrete, Brighton 1987, 293-300.
37. A. Beeldens, D. Van Gemert, 9th Int. Congress on Polymers in Concrete, Bologna 1998, 189-197.
38. Y. Chunwu, N. Shuzhen, 6th Int. Congress on Polymers in Concrete, Shanghai 1990, 318-321.
39. L. Courard, J. Wiertz, A. Darimont, R. Degeimbre, 8th Int. Congress on Polymers in Concrete, Oostende 1995, 119-124.
40. L. Courard, J. Wiertz, A. Darimont, R. Degeimbre, 8th Int. Congress on Polymers in Concrete, Oostende 1995, 585-590.

the lowest for polyvinyl propionate (PVP), nevertheless, not all test results confirm this hypothesis (37, 38).

Besides the type and amount of the polymer, also other factors affect adhesion of PCC materials to the mineral substrate. Particularly, properties of the substrate are important. Moisture content is considered as a key parameter. The too dry substrate can absorb water from a newly applied layer and thus make the Portland cement hydration difficult. On the other hand, if the substrate is too wet, the moisture can migrate to the applied polymer-cement concrete, stopping formation of the polymer co-matrix (39). The proper range of moisture content is rather wide – it is estimated to be 50% to 75%, sometimes even 90% of the full saturation (40).

5. Summing up

The addition of polymers can significantly improve adhesion of the building composites if the polymer is qualitatively and quantitatively selected properly. The improvement of adhesion, similarly to the other properties, is the consequence of the presence of two interpenetrating binders – mineral and polymer – in the material. The type of polymer (pre-mix, post-mix) is not a decisive factor for his effectiveness – the good results can be achieved in both cases.

Polymer-cement concretes constitute a very promising trend of development in building materials engineering. However, many problems are still waiting for full analysis. The following areas are considered to be particular interest:

- introduction of new types of polymers, particularly co-polymers,
- promotion of methods towards simplification of the technological processes, e.g. using epoxy resin without hardener or solid polymers mixed with Portland cement,
- explaining of effect of polymer on the properties of the fibre reinforced materials, improvement of the methods of material designing of PCC composites.

Acknowledgement

Author would like to thank Professor Lech Czarnecki Ph.D., D.Sc. for his valuable remarks and discussion during preparing the paper.

This work has been granted by Polish State Committee for Scientific Research, Project No. 4 T07E 007 26.