

dr inż. Andrzej Garbacz\*  
mgr inż. Tomasz Piotrowski\*  
dr Luc Courard\*\*

# Inżynieria powierzchni betonu. Część 1.

## Struktura geometryczna powierzchni

**D**obre przygotowanie powierzchni betonu jest od lat intuicyjnie określane jako jeden z głównych czynników wpływających na trwałość napraw. Pojęcie odpowiedniego przygotowania powierzchni przed przystąpieniem do nakładania nowej warstwy układu pojawia się od lat w wielu kartach technicznych. Występujące tam jednak sformułowania typu „powierzchnia powinna być czysta, bez widocznych uszkodzeń i ubytków” nie dają istotnych wskazówek dla wykonawcy. Próbowano je więc zawrzeć w Polskiej Normie o statusie Normy Europejskiej PN-EN 1504-10 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz kontrola jakości prac* czy wydanym przez ACI (American Concrete Institute) dwutomowym podręczniku *Concrete Repair Manual*. Obecnie wiedza ta jest porządkowana w ramach jednej dziedziny nauki – **Inżynierii Powierzchni Betonu (IPB)**. Zajmuje się ona właściwościami powierzchni betonu, zarówno w aspekcie zewnętrznej warstwy użytkowej (elementy konstrukcji nowo wznoszonych), jak i podkładu pod inne warstwy (naprawy i wzmocnienia). Głównym zadaniem Inżynierii Powierzchni Betonu jest jakościowe i ilościowe określenie wpływu jakości powierzchni betonu na jego trwałość.

W odniesieniu do napraw i wzmocnień szczególnie istotne jest zapewnienie dużej przyczepności między podkładem betonowym a zewnętrzną warstwą użytkową. Przyczepność zależy od:

- zwilżalności powierzchni podkładu przez materiał naprawczy;

- sił powstających wiązań chemicznych między materiałem naprawczym a podkładem (głównie siły Van der Waalsa);

- uszorstnienia powierzchni i związanego z nim mechanicznego klinowania (adhezja mechaniczna);

- warstwy szczepnej/środków gruntujących (polimerowe lub polimerowo-cementowe).

Ponadto na powierzchni podkładu betonowego nie powinny występować zanieczyszczenia i środki antyadhezyjne, w tym mleczko cementowe.

W celu uzyskania odpowiedniego stanu powierzchni podkładu betonowego zalecane jest stosowanie odpowiednich metod obróbki jego powierzchni. W tym zakresie inżynieria powierzchni betonu skupia się na trzech głównych zadaniach badawczych:

- zdefiniowanie charakterystyk powierzchni istotnych z punktu widzenia trwałości oraz metody ich jakościowego i ilościowego opisu;

- opis wpływu obróbki powierzchni na wartości tych charakterystyk;

- wyznaczenie zależności między tymi charakterystykami a wartościami miar trwałości, np. przyczepności.

Niezależnie od znacznego zindywidualizowania wymagań dotyczących posadzek przemysłowych, w zależności od przewidywanych obciążeń, miejsca ich lokalizacji oraz przewidywanego czasu użytkowania, przyczepność do podkładu betonowego jest jednym z najważniejszych czynników zapewniających właściwą użyteczność i trwałość podłogi. W wielu dokumentach normalizacyjnych przyczepność przy odrywaniu zaliczana jest do wymagań podstawowych i powinna być większa od 1,5 MPa.

Problem właściwego doboru, projektowania i użytkowania posadzek staje się istotny ze względu na notowany ostatnio wzrost powierzchni hal magazynowych i obiektów przemysłowych. W przypadku obiektów istnieją-

cych pojawia się często konieczność naprawy lub modernizacji posadzek. We wszystkich przypadkach istotne jest właściwe przygotowanie powierzchni podkładu betonowego.

### Obróbka powierzchniowa

Obróbka powierzchni może być zastosowana:

- w budowlach nowo wznoszonych – jako część planowego programu w celu zapewnienia trwałości lub określonych walorów estetycznych;

- w budowlach istniejących – w celu polepszenia estetyki lub naprawy, w sytuacji wystąpienia procesu degradacji;

- na podkładzie betonowym w celu przygotowania podłoża przed nałożeniem kolejnej warstwy posadzki układu naprawczego (rysunek 1).

Zarówno PN-EN 1504-10, jak i ACI *Concrete Repair Manual* szczególną uwagę poświęcają obróbce powierzchni jako metodzie właściwego przygotowania podkładu betonowego przed nałożeniem nań warstwy naprawczej, powłoki lub polimerowego systemu ochronnego. Przygotowanie powierzchni jest więc procesem zapewniającym spełnienie podstawowego wymagania PN-EN 1504-10, jakim jest „osiągnięcie wymaganego stanu podłoża w zakresie czystości, szorstkości, zarysowania, wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie, zanieczyszczenia chlorkami lub innymi szkodliwymi substancjami i głębokości ich wnikięcia, głębokości karbonatyzacji, zawilgocenia, temperatury i stopnia skorodowania zbrojenia”. Polega ono na usunięciu „niedźwicznych” fragmentów betonu, uszorstnieniu w celu otrzymania odpowiedniego profilu chropowatości i otwarcia porów powierzchniowych lub oczyszczeniu z substancji zmniejszających przyczepność (mleczko cementowe, pył, olej, luźne fragmenty betonu itp.).

\* Politechnika Warszawska  
\*\* Uniwersytet w Liege





<sup>\*)</sup> jako czynnik agresywny w stosunku do zbrojenia

Rys. 1. Cele stosowania obróbki powierzchniowej wg PN-EN 1504-10 i ACI Concrete Repair Manual

### Metody obróbki powierzchniowej podkładu betonowego

Wybór metody obróbki powierzchniowej jest bardzo ważnym punktem programu naprawy, na który wpływa wiele czynników (rysunek 2).

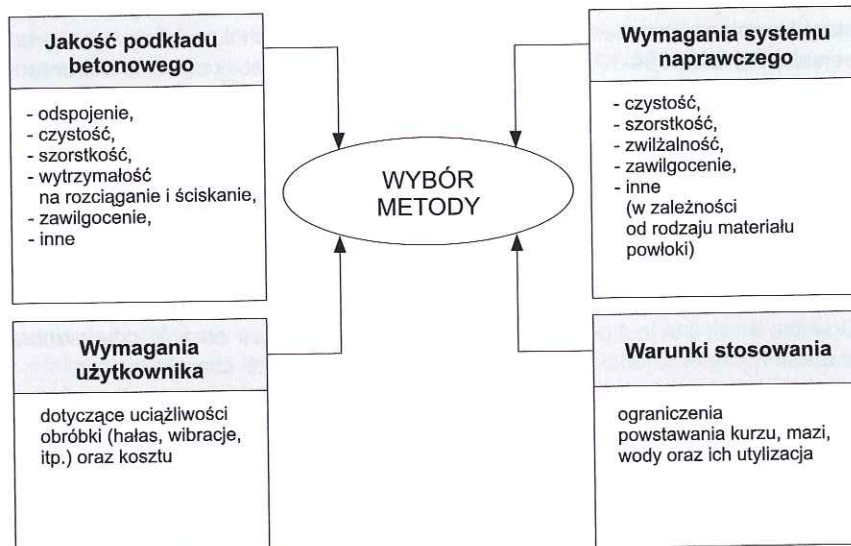
Wybór metody obróbki jest zawsze powiązany z efektem, jaki chcemy uzyskać (tabela 1). Należy przy tym uwzględnić mechanizm usuwania warstwy betonu i stopień agresywności z tym związanej (rysunek 3).

International Concrete Repair Institute w USA zaleca stosowanie dziewięciu wzorców porównawczych do oceny profilu chropowatości betonu po obróbce. Profile CSP (Concrete Surface Profile) ponumerowano od 1 (prawie gładki) do 9 (bardzo chropowaty) wraz z przyporządkowanymi im modelowymi obróbkami (tabela 2). Należy jednak podkreślić, że tekstura i wygląd otrzymanego profilu zależą od wielu czynników, takich jak wytrzymałość, wielkość i rodzaj kruszywa, a także wykończenie powierzchni (np. zacieranie). W związku z tym jednym z celów inżynierii powierzchni betonu jest znalezienie miarodajnych wskaźników opisujących strukturę geometryczną powierzchni.

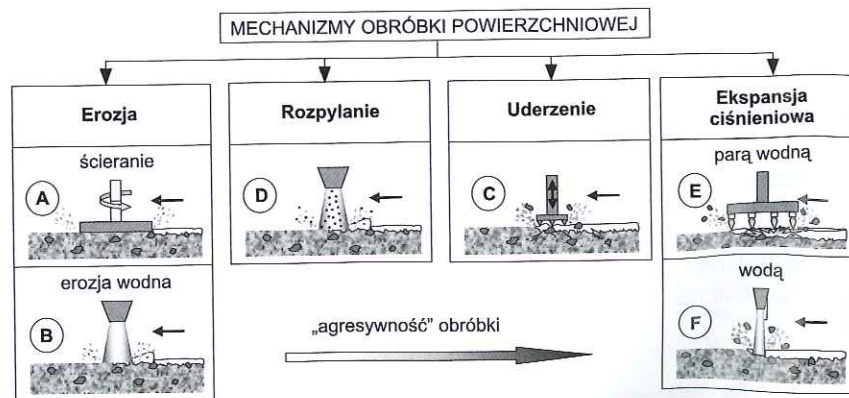
### Metody badań geometrii powierzchni podkładu betonowego

Norma PN-EN 1504-10 w części dotyczącej uszorstnienia zamieszcza dodatkowe wymaganie dotyczące określenia tekstury uszorstnionej powierzchni, która powinna być odpow...

wiednia dla stosowanych wyrobów i systemów. Przywołuje ona dwie metody oznaczania szorstkości powierzchni – profilometrię i metodę piaskową. Istotą metody piaskowej jest pomiar głębokości makrotekstury metodą objętościową w celu określania



Rys. 2. Czynniki wpływające na wybór metody obróbki powierzchniowej wg ACI Concrete Repair Manual



Rys. 3. Mechanizmy obróbki powierzchniowej wg ACI Concrete Repair Manual

cech powierzchniowych nawierzchni drogowych i lotniskowych wg normy PN-EN 13036-1. Polega ona na ostrożnym rozproszczeniu znanej objętości (25 ml) materiału ziarnistego (kulki szklane  $d = 0,18 - 0,25$  mm) na nawierzchni i zmierzeniu całkowitej powierzchni nim pokrytej. Średnią głębokość makrotekstury powierzchni MTD, którą jest różnica między poziomem zagłębienia między wystającymi ziarnami grysów a ich wierzchołkami, oblicza się ze wzoru:

$$MTB = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$$

gdzie: MTD – średnia głębokość tekstury [mm], V – objętość próbki materiału ziarnistego [mm<sup>3</sup>], D – średnica koła pokrytego materiałem ziarnistym [mm].

Norma PN-EN 1766 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych; Metody badań. Betony wzorcowe do badań zaleca stosować piasek

Tabela 1. Metody obróbki powierzchniowej wg ACI Concrete Repair Manual

Metoda	Mechanizm	Zastosowanie
Szczotkowanie	A	oczyszczanie – chemiczne usuwanie kurzu, brudu, oleju, smarów, tłuszczu i innych osadów
Mycie niskociśnieniowe	B	oczyszczanie – usuwanie kurzu, brudu, zanieczyszczeń wodorozpuszczalnych, gruzu oraz innego luźnego, kruchego materiału z powierzchni, nie powoduje usunięcia znacznej ilości betonu, powinno być stosowane jako uzupełnienie innych metod
Wytrawianie kwasowe	B	oczyszczanie – chemiczne wytrawienie zaprawy cementowej z powierzchni i porów betonu, powoduje odstąpienie kruszywa
Szlifowanie	A	oczyszczanie – usunięcie luźnych fragmentów oraz mleczka cementowego i innych cienkich powłok (kleju) z powierzchni uszerstnienie – nie powoduje uszerstnienia powierzchni, a wręcz ją wygładza
Piaskowanie	D	oczyszczanie – mechaniczne usuwanie z powierzchni betonu zanieczyszczeń i cienkich, kruchych powłok lub warstw adhezyjnych uszerstnienie – z zależności od ciśnienia, czasu ekspozycji i rodzaju piasku różne profile powierzchni (od szczotkowanej do śrutowanej) usuwanie fragmentów betonu – max do głębokości ok. 1 mm
Śrutowanie	D	oczyszczanie – jw., materiałem ściernym jest śrut stalowy uszerstnienie – w większym stopniu niż piaskowanie, profil zależy od wielkości i kształtu granulatu ścierniwa usuwanie fragmentów betonu – max do głębokości ok. 6 mm
Frezowanie – zdrapywanie	A, C	uszerstnienie – profil o amplitudzie >0,2 mm, zalecana grubość powłoki >0,375 mm, profil regularny o równoległych rowkach, może powodować powstawanie otwartych rys przypowierzchniowych usuwanie fragmentów betonu – usuwanie kruchych powłok (epoxy, poliuretan itp.) i przygotowanie przed położeniem nowej warstwy, niwelowanie dużych nierówności max do głębokości: ok. 6 mm – mały sprzęt, ok. 20 mm – duży sprzęt
Łuskowanie igłowe	C	uszerstnienie – profil o równomiernych kraterach wokół większego kruszywa; przypominający skórkę pomarańczy usuwanie fragmentów betonu – usuwanie cienkich sprężystych powłok, max do głębokości ok. 3 mm
Lanca wodna	F	uszerstnienie – profil nierównomierny zależy od końcówki lancy wodnej, przy odpowiednim prowadzeniu mogą powstać równomierne rowki usuwanie fragmentów betonu – w zależności od ciśnienia (30 – 300 MPa) aż do 19 mm
Młotkowanie	C	uszerstnienie – profil nierównomierny zależy od końcówki młota pneumatycznego, przy odpowiednim prowadzeniu mogą powstać równomierne rowki, może powodować powstawanie otwartych rys przypowierzchniowych usuwanie fragmentów betonu – max do głębokości ok. 19 mm
Obróbka płomieniowa	E	uszerstnienie – płomień acetylenowo-tlenowy powoduje nagły wzrost temperatury wody kapilarnej i zaadsorbowanej przez spoiwo cementowe, powodując nagły wzrost ciśnienia i naprężeń rozciągających, w efekcie rozsadzenie przypowierzchniowej warstwy podkładu, profil nieregularny wysokości do 6 mm usuwanie fragmentów betonu – max do głębokości ok. 6 mm
Frezowanie – żłobienie	C	uszerstnienie – bardzo chropowata rowkowana powierzchnia o wysokości profilu do 13 mm, liczba rowków zależy od liczby i wymiarów „zębów” frezarki usuwanie fragmentów betonu – do usuwania dużych połaci powłok – najczęściej stosowana w drogownictwie

kwarcowy (zamiast szklanych kulek) o wymiarze ziaren  $d = 0,05 - 0,1$  mm, wysuszony do stałej wagi. Wskaźnik chropowatości oblicza się ze wzoru:

$$\frac{31\,800}{D^2}$$

Norma dopuszcza też stosowanie innej objętości piasku (5 – 25 ml) i w takim wypadku wzór przyjmuje postać:

$$\frac{v}{D^2 \cdot 1272}$$

gdzie:  $v$  – objętość piasku [ml].

Drugą metodą pomiaru chropowatości jest **profilometria**, która polega na odwzorowaniu profilu na płaszczyźnie XY. Wyróżniamy profilometrię mechaniczną i laserową. **Profilometr mechaniczny** składa się z rysika, który jest przesuwany po powierzchni, a zmianę jego położenia w pionie i w poziomie rejestruje komputer i tworzy profil powierzchni. Po wykonaniu wielu pomiarów wzdłuż linii równoległych, oddalonych od siebie o stałą odległość, powstanie obraz powierzchni 3D (tabela 3). Należy zaznaczyć, że czułość profilometrii mechanicznej zależy od średnicy główki rysika (im mniejsza główka, tym większa dokładność pomiaru). Niedogodnością tej metody jest to, że może być stosowana tylko w warunkach laboratoryjnych.

**Zasada działania profilometru laserowego** polega na pomiarze odległości między emitерem wiązki laserowej a powierzchnią na podstawie różnicy czasu wyjścia i przyścia i skonstruowaniu obrazu powierzchni. Wadą tej metody jest rozpraszanie wiązki laserowej wewnątrz ziaren niektórych rodzajów kruszywa, np. kwarcu.

Odmianą techniki laserowej jest **optomorfologia**, w której wykorzystuje się tzw. projekcję prążków Moiré'a (rysunek 4). Wiązka czerwonego lasera emitowana jest pod kątem 45° do powierzchni, a po odbiciu rejestrowana za pomocą specjalnej kamery CCD umieszczonej pod kątem 90° (rysunek 4b) jako układ prążków (rysunek 4c, d). Następnie wg zasady trójkątów obliczana jest wysokość profilu ( $h$ ). Ze względu na niewielką rozdzielczość pionową, metodą tą nie można określić parametrów falistości i chropowatości, a jedynie parametry profilu całkowitego. Jej zaletą jest



Tabela 2. Wzorce profilu powierzchni i odpowiadające im obróbki powierzchniowe wg ACI Concrete Repair Manual

Profil Powierzchni Betonu (Concrete Surface Profile – CSP)	Szczotkowanie	Mycie niskociśnieniowe	Wytrawianie kwasowe	Szlifowanie	Piaskowanie	Śrutowanie	Zdrapywanie	Łuskowanie igłowe	Lanca wodna	Młotkowanie	Obróbka promienna	Frezowanie
CSP 1	■	■	■	■								
CSP 2					■							
CSP 3					■	■						
CSP 4					■	■	■					
CSP 5					■	■	■	■				
CSP 6					■	■	■	■	■			
CSP 7					■	■	■	■	■	■		
CSP 8					■	■	■	■	■	■	■	
CSP 9					■	■	■	■	■	■	■	■

możliwość stosowania bezpośrednio w obiekcie.

Cechy geometryczne zarejestrowanego obrazu profilu (lub powierzchni) charakteryzowane są za pomocą parametrów statystycznych obliczonych zgodnie z EN ISO 4287 (tabela 4).

Stożek rozwinięcia powierzchni charakteryzowany jest również za pomocą parametrów, tzw. krzywej Abbotta'a. Wyznacza się ją przez podział profilu liniami poziomymi w równych odstępach. Następnie dla każdej linii liczy się stosunek procentowy długości linii przechodzącej przez materiał do całkowitej długości linii (rysunek 5). Ze wzrostem chropowatości powierzchni rośnie nachylenie środkowej części krzywej Abbotta'a.

Charakter krzywej Abbotta'a opisują trzy parametry:

- $C_R$  – względna wysokość pików;
- $C_F$  – głębokość profilu z wyłączeniem pików i dolin;
- $C_L$  – względna głębokość dolin.


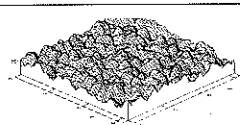
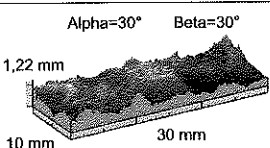

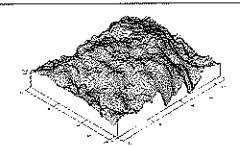
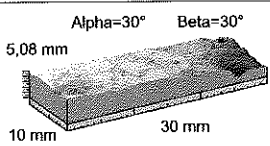
Wyznacza się je, aproksymując krzywą prostą pomiędzy punktami przegięcia. Wartość parametrów  $C_R$ ,  $C_F$  i  $C_L$  wyznacza miejsce przecięcia aproksymowanej prostej z prostymi oznaczającymi 0% i 100% zawartości materiału (rysunek 5). Parametr  $C_R$  pozwala określić gładkość powierzchni (im jest mniejszy, tym powierzchnia jest gładziej i wymaga mniej materiału do wypełnienia przestrzeni pomiędzy wzniesieniami), a parametr  $C_L$  – głębokość pęknięć i pustek znajdujących się w warstwie wierzchniej. Jest to istotne przy określaniu lepkości żywicy lub zaprawy, która powinna wypełnić puste przestrzenie. Im parametr ten jest większy, tym mniejsza powinna być lepkość materiału naprawczego.

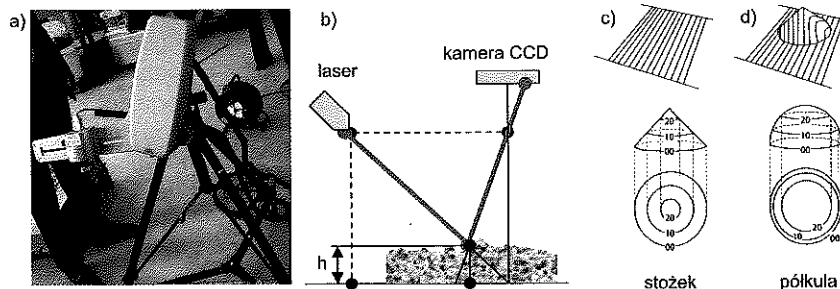
### Struktura geometryczna a przyczepność

Wpływ stopnia rozwinięcia, wynikający z zastosowanej obróbki powierzchni betonu, na przyczepność jest niejednoznaczny. Badania prowadzone na Politechnice Warszawskiej, we współpracy z Uniwersytetem w Liege, wskazują, że wzrost uszorstnienia powierzchni jest korzystny w przypadku podkładów wykonanych z betonów wyższych klas wytrzymałości (rysunek 6). Przeciwną tendencję obserwuje się w przypadku betonów niższych klas wytrzymałości, gdyż obróbka zapewniająca większe uszorstnienie powoduje jednocześnie większe uszkodzenie przypowierzchniowej warstwy betonu (mikropęknięcia). Zagadnienie to zostanie omówione bardziej szczegółowo w drugiej części artykułu.

Z punktu widzenia szorstkości powierzchni po obróbce istotna jest również właściwa konsystencja zaprawy naprawczej. Mała urabialność zaprawy może skutkować niecałkowitym wypełnieniem nierówności powierzchni i spadkiem przyczepności. W wielu przypadkach mała urabialność zaprawy jest wynikiem obecności zbrojenia rozproszonego (np. mikrowłókien szklanych) jako dodatku obniżającego skurcz utwardzania. Jeśli odległość

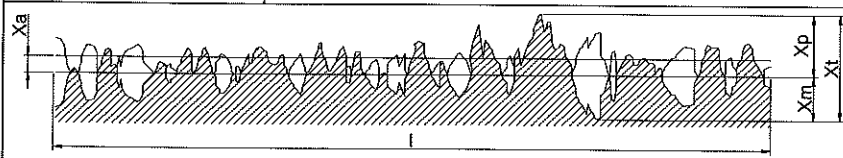
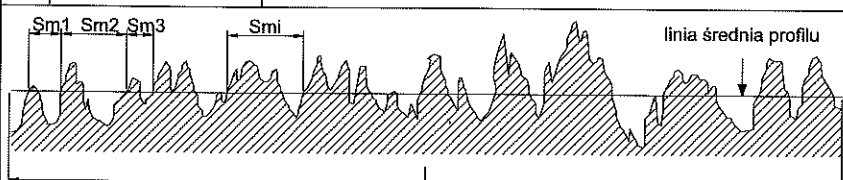
Tabela 3. Przykład wizualizacji struktury geometrycznej powierzchni betonu po obróbce powierzchniowej, otrzymane przy wykorzystaniu metody mikroskopowej (mikroskop świetlny) oraz profilometrii mechanicznej i laserowej

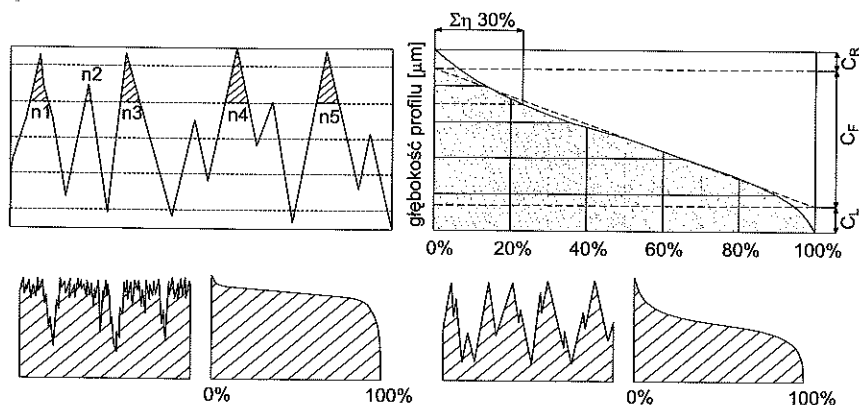
Profil powierzchni otrzymany metodą mikroskopową (mikroskop świetlny – pow.10x)	Odwzorowanie falistości powierzchni otrzymane za pomocą profilometru mechanicznego	Odwzorowanie falistości powierzchni otrzymane za pomocą profilometru laserowego
<p>Piaskowanie</p> 		<p>Alpha=30° Beta=30°</p>  <p>1,22 mm 10 mm 30 mm</p>
<p>Frezowanie mechaniczne</p> 		<p>Alpha=30° Beta=30°</p>  <p>5,08 mm 10 mm 30 mm</p>



Rys. 4. Widok profilometru laserowego (a), schemat zasady trójkątów do obliczania wysokości profilu – h (b), przykładowe układy prożków w przypadku powierzchni płaskiej bez i z kawałkami (c) oraz zależność między kształtem a układem prożków dla stożka i półkuli

Tabela 4. Parametry statystyczne profilu wg EN ISO 4287

$m_x$	Linia i wartość średnia	Linia, której poziom (wartość średnia) jest określony przez minimum sumy odchylenia kwadratowego profilu, zdefiniowana następująco: $X = \min \sum y^2(x)$
$X_p$	max wysokość pików	odległość między max punktem profilu a linią średnią
$X_m$	max głębokość	odległość między min punktem profilu a linią średnią
$X_t$	max wysokość profilu	odległość między max i min punktem profilu $X_t = \max(X_p + X_m)$
$X_a$ $X_v$	odchylenie standardowe	średnia odległość profilu od linii średniej, zdefiniowana następująco: $X_a = \frac{1}{l} \int_0^l  y(x)  dx$ , w przybliżeniu $X_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i $
$X_q$	średnie odchylenie kwadratowe	wariacja – wartość oczekiwana kwadratu odchylenia profilu od linii średniej: $X_q^2 = \frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx$
		
$S_k$	współczynnik skośności	wskaźnik asymetrii w stosunku do linii średniej: $S_k = \frac{1}{X_q^3} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^3$
$S_m$	średni okres	wartość średnia długości linii średniej, zawierającej pik dodatni i ujemny: $S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$
		



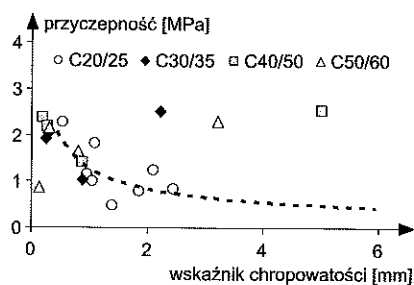
Rys. 5. Schemat wyznaczania krzywej Abbotta (u góry) oraz przykłady krzywych uzyskane dla powierzchni

między pikami profilu jest mniejsza niż długość włókien, można obserwować blokowanie ich na nierównościach powierzchni i w konsekwencji utrudnione wypełnienie tych miejsc zaprawą. W tej sytuacji często konieczne jest stosowanie warstwy szpempnej, wypełniającej nierówności powierzchni i zwiększającej adhezję mechaniczną (mechaniczne klinowanie). Dodatko-

wo zmniejsza ona skutki stosowania agresywnej obróbki, gdyż wypełnia większe pęknięcia i wiąże fragmenty betonu luźno związane z podkładem.

### Podsumowanie

Analiza relacji między właściwościami powierzchni betonu a trwałością naprawy stanowi ważne zadanie



Rys. 6. Zmiana przyczepności ze wzrostem wskaźnika chropowatości (oznaczonego zgodnie z PN-EN 1766) podkładów betonowych różnych klas wytrzymałości, poddanych obróbce powierzchniowej o zróżnicowanej agresywności

badawcze nowej dziedziny nauki – inżynierii powierzchni betonu. Tego rodzaju analiza wymaga dysponowania odpowiednimi narzędziami badawczymi, umożliwiającymi sformułowanie odpowiednich zależności ilościowych. W artykule przedstawiono metody opisu struktury geometrycznej (uszczerbnienia) powierzchni oraz przedyskutowano jej wpływ na przyczepność. Badania przeprowadzone na Politechnice Warszawskiej i Uniwersytecie w Liege wskazują, że większe uszczerbnienie odgrywa korzystną rolę w przypadku betonów wyższych klas wytrzymałości. W odniesieniu do betonów niższych klas dużą rolę w kształtowaniu przyczepności odgrywają mikropęknięcia, których gęstość rośnie z agresywnością zastosowanej obróbki powierzchniowej. Zagadnienie to zostanie omówione w drugiej części artykułu.

Znaczenie właściwego przygotowania podkładu betonowego przed nałożeniem warstwy naprawczej, powłoki lub polimerowego systemu ochronnego podkreślono zarówno w PN-EN 1504-10, jak i ACI Concrete Repair Manual. Z tego względu szczególne znaczenie ma dobór odpowiedniej obróbki powierzchni. W jej wyniku kształtowane są bowiem właściwości powierzchni podkładu betonowego, w istotny sposób wpływające na przyczepność do podkładu, a w konsekwencji na trwałość naprawy.

Autorzy składają podziękowania Panu Profesorowi Lechowi Czarneckiemu za inspirację i owocną dyskusję. Praca powstała w ramach wspólnego projektu Polska (MNiSW) – Walonia (DRI), Belgia. Artykuł finansowano ze środków pracy statutowej PW – grant 504 G 1080 3006.