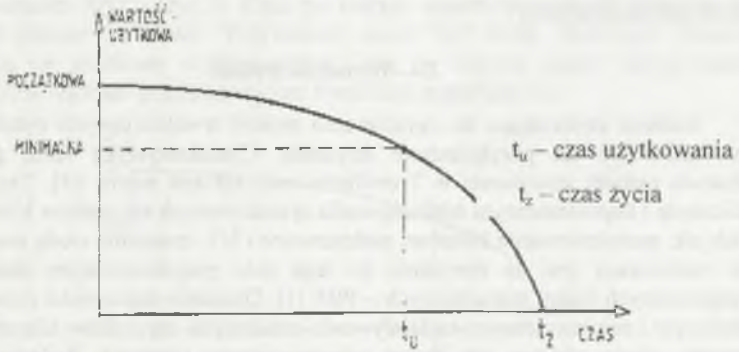
Jan MIKOŚ [1]
Jerzy BOCHEN [2]
Jan SPYCHAŁA [2]
Mieczysław ANDREASIK [3]

METODA OCENY TRWAŁOŚCI MATERIAŁÓW ELEWACYJNYCH NA PODSTAWIE TESTU PRZYSPIESZONEGO STARZENIA

1. Trwałość materiałów elewacyjnych

Rozpatrując trwałość poszczególnych elementów budowli np. budynków, nietrudno zauważyć, że w dużej mierze zależy ona od właściwości materiałów bezpośrednio stykających się ze środowiskiem zewnętrznym i podlegającym jego agresywnemu oddziaływaniu. Dotyczy to szczególnie wypraw tynkowych i zewnętrznych faktur ścian osłonowych budynków. Mechanizm niszczenia tych materiałów jest zjawiskiem złożonym i zależy od wielu czynników. Z tego punktu widzenia najczęściej rozpatruje się wpływ atmosfery gazowej, zawierającej dwutlenek węgla i chlorki [7,8].



Rys.1. Zmiany trwałościowe właściwości użytkowych materiału (elementu) budowlanego w czasie

Taki typ agresji ma szczególne znaczenie dla konstrukcji żelbetowych, trwałości których decyduje otulina betonowa oraz odporność zbrojenia na procesy korozyjne.

---

[1] Prof.dr inż., [2] Mgr inż. – Katedra Procesów Budowlanych, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice,
[3] Dr inż. – PPHU „Thermodom" Żory

W pozostałych przypadkach, związanych z materiałami nie zbrojonymi takimi jak: beton, ceramika i zaprawy, istotną rolę w odporności na czynniki zewnętrzne odgrywa ich budowa strukturalna [10]. Ma ona wpływ na możliwość i szybkość penetracji agresywnych czynników w głąb. Od niej zależy również odporność na oddziaływania termiczno–wilgotnościowe. Wszystko to zależy również od: składników materiałowych i dodatków, ilości spoiwa, stosunku w/c, konsystencji, jakości wykonania i pielęgnacji.

Jest to czas po którym osiągany jest graniczny stan użytkowania. Stan ten określony jest przez odpowiednie kryterium np. odkształcenie, zarysowanie, ubytek masy itp. Po osiągnięciu stanu granicznego użytkowania, materiał lub element budowli przestaje spełniać wymagania techniczne, choć może jeszcze funkcjonować, aż do momentu całkowitej destrukcji , określonego jako czas życia („life time") (Rys.1). Istotną rolę w kształtowaniu trwałości odgrywa budowa porowatej struktury materiału. Mniejsza objętość porów wpływa korzystniej na odporność w czasie. Wraz ze wzrostem produktów hydratacyjnych wzrasta ilość porów żelowych, a tym samym maleje ilość porów kapilarnych i wzrasta szczelność materiału. Ma to korzystny wpływ na ilość wilgoci i gazów przenikających do struktury, a tym samym na trwałość. W kwestii tej znaczenie ma wielkość porów. Duża ilość porów molekularnych poniżej 50 A utrudnia wnikanie wody. W przedziale od 50÷1000 A wilgoć przenika na zasadzie dyfuzji. W porach kapilarnych wilgoć jest transportowana na zasadzie podciągania kapilarnego. Jednocześnie wypełnienie porów wodą utrudnia przepływ agresywnych gazów. Przy oddziaływaniu temperatur, zwłaszcza niskich, znaczenie odgrywają pory z zakresu 0,1÷1,0 μm, w których lód powoduje największe uszkodzenia [11]. W wyniku destrukcji mrozowej może nastąpić spadek wytrzymałości materiału lub ubytki masy. Cechy te mogą stanowić kryterium oceny trwałości. Tworząc model, uzależniający wielkość destrukcji od wybranych cech materiałowych i czasu, można z pewnym przybliżeniem oceniać trwałość materiałów. W niniejszej pracy przedstawiono propozycję takiej metody.

2. Metodyka badań

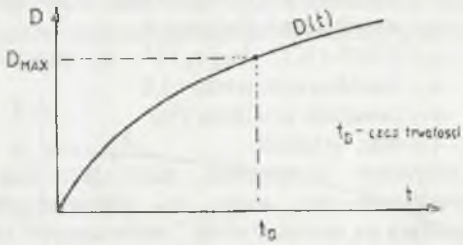
Badania zmierzające do opracowania modeli trwałościowych oparto na teście odpornościowym na przyśpieszone starzenie. Charakterystykę testu przyjęto na podstawie metody stosowanej w Trondheim oraz założeń normy [4]. Test polega na cyklicznym i naprzemiennym oddziaływaniu symulowanych czynników klimatycznych, takich jak: promieniowanie świetlne, podczerwone i UV, zraszanie wodą oraz mrożenie. Test realizowany jest na specjalnie do tego celu przystosowanym stanowisku do przyśpieszonych badań starzeniowych – PBS [1]. Działanie stanowiska polega na przyśpieszonym i naprzemiennym oddziaływaniu sztucznych czynników klimatycznych na materiały, czego efektem jest proces przyspieszonego starzenia. Badaniom poddano wybrane materiały ścian zewnętrznych takie jak: tynki mineralne zwykłe, tynki pocienione, cegła ceramiczna, beton komórkowy i gips. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do opracowania przybliżonych modeli prognozowania trwałości. Zgodnie z [6] przyjęto całkowity czas badań wynoszący 90 cykli badawczych, przy czym każdy z cykli składa się z 4 cykli jednostkowych – jednogodzinnych, co łącznie z czasem potrzebnym na obrót komory centralnej daje 4,5 godziny na cykl badawczy. Cykle jednostkowe stanowiska sprowadzono więc do ciągłego 60 minutowego oddziaływania na kolejne ściany komory centralnej poszczególnych mediów: promieniowania świetlnego, mrozu i wody. W trakcie trwania testu rejestrowano zachodzące zmiany makroskopowe oraz zmiany struktury porowatości i cech fizycznych badanych materiałów.

3. Podstawy modelowania trwałości

Przy opracowaniu metody wykorzystano założenia ogólnej teorii zniszczenia i użytkowalności [9], w myśl której granicę trwałości rozpatruje się jako czas , po upływie którego osiągany jest stan graniczny pewnej cechy eksploatacyjnej. Czas ten może dotyczyć stopnia destrukcji bądź stanu użytkowego. W przypadku pierwszym destrukcja zachodzi wówczas, gdy odporność jest mniejsza od oddziaływania niszczącego.

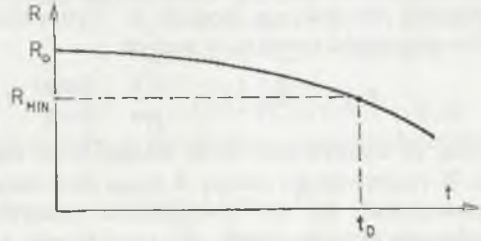
$$\{ \text{DESTRUKCJA} \} \Leftrightarrow \{ R < S \} \qquad (1)$$

Zgodnie z tą relacją, model trwałości można przedstawić jako krzywą zniszczenia D(t) – (rys.2):



Rys.2. Destrukcyjny model trwałości

Czas po którym zostanie osiągnięte dopuszczalne zniszczenie jest trwałością. Jako przykład może posłużyć destrukcja mrozowa w postaci ubytków masy. Mrozoodporność zostanie wyczerpana gdy ubytki masy przekroczą 5% masy początkowej. Trwałość można także zamodelować pod kątem użytkowalności , jako krzywą odporności R(t) – (rys.3). Czas po którym odporność osiągnie dopuszczalny poziom jest czasem trwałości. Przykładem może być także destrukcja mrozowa przejawiająca się spadkiem wytrzymałości. Czas po którym spadek wytrzymałości przekroczy 20% wartości początkowej jest trwałością materiału (5).



Rys.3. Użytkowy model trwałości

Przedstawione powyżej modele trwałości mogą być zastosowane do opisu destrukcji mrozowej i powierzchniowej – wywołanej penetracją deszczu i nagrzewem. Zgodnie z [9] destrukcję mrozową można opisać jako funkcję czasową wytrzymałości i masy. Na skutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania wytrzymałość maleje i zmienia się wg relacji (2):

$$R(t) = R_{28}\,[\,1 - (\,1 - (\,\frac{d}{h}\,)^{n}\,)\,] \qquad (2)$$

gdzie : d – głębokość od powierzchni próbki
h – głębokość wpływu zamrażania
n – liczba cykli zamrażania

Powyższemu zjawisku towarzyszy ubytek masy , który narasta z czasem wg wzoru:

$$m_1(t) = [\,c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot a^{-0,7} \cdot (R_{28} + 8)^{-1,4}\,] \cdot t \qquad (3)$$

gdzie : c_1 – współczynnik środowiskowy : 2,0 ÷ 160
c_2 – współczynnik pielęgnacji
$c_2 = [\,0,85 + 0,17 \cdot \log(t_p)\,]^{-1}$, t_p – czas pielęgnacji w dniach
c_3 – współczynnik wieku : 1,0
a – zawartość powietrza [%]
t – czas w latach

Pozostałe oddziaływania klimatyczne, takie jak: nagrzewanie, wpływy wilgotnościowe, wypłukiwanie soli wodą, są odpowiedzialne za destrukcję powierzchniową , objawiającą się ubytkami masy , zmieniającymi się również z czasem wg zależności:

$$m_2(t) = [\,c_1 \cdot c_2 \cdot R_{28}^{-3,3}\,] \cdot t \qquad (4)$$

gdzie : c_1 – współczynnik środowiskowy : 50 ÷ 500000
c_2 – współczynnik pielęgnacji, j.w.

4. Modelowanie trwałości w oparciu o zmiany wytrzymałości

Przedmiotowe modele opracowano dla wyników uzyskanych z badań starzeniowych losowo wybranych materiałów elewacyjnych, w przewadze tynków [2][3]. Do prognozowania trwałości w oparciu o wytrzymałość wykorzystano destrukcyjny zmodyfikowany model trwałości w postaci:

$$R(t) = R_{28}\,[\,1 - (\,\frac{d}{H} \cdot k\,)^{0,25\,n} \cdot t\,)] \qquad (5)$$

Ze wzoru wynika, że wytrzymałość może osiągać tylko wartości mniejsze od wartości początkowej. W rzeczywistości zmiany te mogą mieć inny charakter. Wpływ hydratacji może spowodować tuż po stwardnieniu materiału dalszy wzrost wytrzymałości. W badaniach przyjęto jednak, dla uproszczenia zagadnienia, że test wykonywany jest na materiałach całkowicie zhydratyzowanych, a w przypadku wystąpienia w/w zjawiska potraktowano go jako zakłócenie i nie brano pod uwagę możliwych przyrostów wytrzymałości w okresie początkowym. W celu adaptacji w/w wzoru dla potrzeb stanowiska PBS przyjęto wersję zmodyfikowaną

gdzie: $k = \rho_{P\,90} \,/\, \rho_{P\,o}$,

$\rho_{P\,90}$ - gęstość rzeczywista po 90 cyklach,

$\rho_{P\,o}$ - gęstość rzeczywista przed testem starzeniowym,

d / H - przyjęto jako 0,8 dla strefy zasięgu mrozu 20%

przykładowo - tynk Euromix 3.02: R_{28} = 11,30 MPa,

n = 90 / 4 = 22,5 cykli normowych,

$\rho_{P\,o}$ = 2,754 g / cm^3

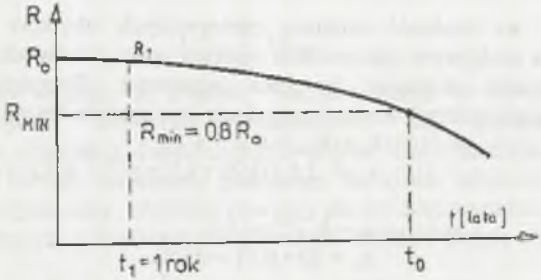
$\rho_{P\,90}$ = 2,742 g / cm^3

k = $\rho_{P\,90}$ / $\rho_{P\,o}$ = 2,743 / 2,754 = 0,996

zatem, wytrzymałość po 90 cyklach wynosić będzie:

R (90c) = 11,75 [1- (0,8 • 0,996)^{22,5}] = 11,22 MPa

Zgodnie z pracą [2] przyśpieszenie procesów starzeniowych w komorze PBS w stosunku do warunków naturalnych, wynosi około 12 ÷ 14. Oznacza to, że efekty testu starzeniowego, trwającego 90 cykli tj. około 1 miesiąc (4 ÷ 5 cykli na dobę), są porównywalne ze starzeniem naturalnym, trwającym 1 rok. Znając więc przewidywane zmiany wytrzymałości po 1 roku oraz limit trwałościowy, wynoszący 20% spadku wytrzymałości względem wartości początkowej, można oszacować trwałość zgodnie z modelem (rys.4.) :



Rys.4. Wytrzymałościowy model trwałości

Przyjmując minimalną dopuszczalną wartość wytrzymałości, wynoszącą 80% wartości początkowej oraz jej liniowy przebieg R(t) = a • t + R_o za którym przemawiają : małe zmiany w czasie t_1 , brak pomiarów pośrednich , można określić dla każdego z materiałów przybliżony teoretyczny model wytrzymałościowy ich trwałości.

Przykładowo model taki dla tynku Euromix 3.02 będzie wyglądał następująco :

R_0 = 11,30 MPa , R_1 = 11,22 MPa

R_{min} = 0,8 x 11,30 = 9,04 MPa

zatem: R(t) = a · t + R_0 ,

gdzie: a = (11,22 - 11,30) / 1,0 = - 0,08

Z modelu tego wynika, że przewidziany okres trwałości będzie wynosił :

$$t_T = \frac{1}{a} (R_{min} - R_0) \qquad (6)$$

zatem, dla tynku Euromix 3.02 : t_T = (9,04 - 11,30) / (- 0,08) = 28,3 lat

Dla pozostałych materiałów wytrzymałościowe modele trwałości oraz odpowiadające im przewidywane okresy trwałości będą wynosić odpowiednio - (tabl. 1)

5. Modelowanie trwałości w oparciu o zmiany masy

Do prognozowania trwałości w oparciu o zmiany masy wykorzystano model zaproponowany w pracy [9] . Jest to model teoretyczny , opisujący przyrosty ubytków masy w czasie, wywołane procesami starzeniowymi. Model ma charakter empiryczny i obejmuje ubytki masy wywołane destrukcją dwojakiego rodzaju: destrukcję mrozową – m_1(t), destrukcję powierzchniową – m_2(t), gdzie:

Tablica 1. Wytrzymałościowe modele i przewidywane okresy trwałości

Lp.	Rodzaj materiału	R (t)	Trwałość t_T[lata]
1.	Cegła ceramiczna	- 0,07 • t +12,38	35
2.	Tynk cementowy	- 0,1 • t +11,92	24
3.	Tynk „Ytong"	- 0,013 • t +1,73	27
4.	Tynk „Wega"	- 0,09 • t +13,64	30
5.	Tynk „Euromix" 3.02.	- 0,082 • t +11,75	28
6.	Tynk cem-wap	- 0,03 • t +3,01	20

gdzie:

$$m_1(t) = [\, c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot a^{-0,7} \cdot (R_{28} + 8)^{-1,4} \,] \cdot t \qquad (3)$$

$$m_2(t) = [\, c_1 \cdot c_2 \cdot R_{28}^{-3,3} \,] \cdot t \qquad (4)$$

$$M(t) = m_1(t) + m_2(t) \qquad (7)$$

Z uwagi na trudność pomiaru rzeczywistych ubytków w trakcie testu starzeniowego, w niniejszym opracowaniu zrezygnowano z doświadczalnej weryfikacji powyższych modeli, traktując je jako ostateczne. Przyjmując odpowiednie współczynniki w powyższych wzorach, uzyskano dwa modele destrukcyjne:

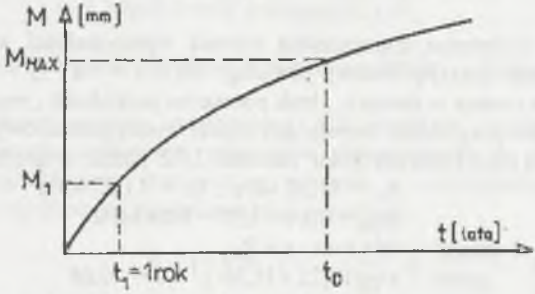
$$m_1(t) = k_1 \bullet (R_{28} + 8)^{-1,4} \bullet t \qquad (8)$$

gdzie : $k_1 = 2,0 \bullet 0,91 \bullet 1,0 \bullet p^{-0,7} = 1,82 \bullet p^{-0,7}$

oraz:

$$m_2(t) = k_2 \bullet R_{28}^{-3,3} \bullet (t) \qquad (9)$$

gdzie : $k_2 = 50 \bullet 0,91 = 45,5$



Rys. 5. Destrukcyjny masowy model trwałości

Prognozowanie trwałości z wykorzystaniem powyższych wzorów oparto na idei destrukcyjnego modelu trwałościowego (rys.5).

Zgodnie z charakterem modelu masowego, w którym zmiany ubytków są proporcjonalne do czasu (stałe ubytki roczne), przyjęto w powyższym modelu zmienność liniową:

$$M = a \bullet (t) \quad [\, mm / rok \,] \qquad (10)$$

W celu wyznaczenia współczynnika „a" wykorzystano zależność , że długość testu starzeniowego odpowiada starzeniu naturalnemu o długości 1 roku. Przykładowo, roczne ubytki masy dla poszczególnych materiałów oraz proponowane masowe modele trwałości mogą być następujące – (tabl.2). W dwóch przypadkach odrzucono nadmierne wyniki destrukcji powierzchniowej (*) traktując te wartości jako błędne.

Tablica 2.

Lp.	Rodzaj materiału	m_1 [mm/rok]	m_2 [mm/rok]	M [mm/rok]	M(t) = a • t
1.	Cegła ceramiczna	0,0039	0,0113	0,0152	0,0152 • t
2.	Tynk „Ytong"	0,0131	7,455 *	7,4686	0,0131• t
3.	Tynk cementowy	0,0046	0,0137	0,0173	0,0173 • t
4.	Tynk cement.-wap.	0,0109	1,212 *	1,223	0,0109 • t
5.	Tynk Euromix 3.02	0,0049	0,0128	0,0177	0,0177 • t
6.	Tynk Wega	0,0049	0,0082	0,0131	0,0131 • t

Z tak opracowanych modeli wynika , że przewidywany okres trwałości będzie wynosił :

$$t_T = \frac{1}{a} M_{max} \qquad (11)$$

Z zależności wynika, że trwałość będzie to czas, w którym ubytki masy wywołane destrukcją termiczno–wilgotnościową nie przekroczą wartości dopuszczalnej. Do określenia dopuszczalnego ubytku masy zaadoptowano zalecenia normowe [5] wg których dla betonu poddanego badaniom odporności na działanie mrozu metodą przyśpieszoną , ubytki te powinny przekraczać wartości 0,05 cm^3/cm^2 . Zgodnie z tym zaleceniem dopuszczalna głębokość ubytków będzie wynosić: M_{max} = 0,5 mm/m^2 .

Dla tak przyjętego modelu destrukcji mrozowej przewidywane okresy trwałości poszczególnych materiałów wynosić będą odpowiednio – (tabl.3). W dwóch modelach wartości trwałości określono z wykluczeniem destrukcji powierzchniowej (*), stosownie do założenia w tabeli 2.

Tablica 3.

Lp.	Rodzaj materiału	M (t) = a • t	TRWAŁOŚĆ t_T [lata]
1.	Cegła ceramiczna	0,0152 • t	32
2.	Tynk „Ytong"	* 0,0131 • t	*19
3.	Tynk cementowy	0,0173 • t	29
4.	Tynk cement.-wap.	* 0,0109 • t	* 23
5.	Tynk Euromix 3.02	0,0177 • t	28
6.	Tynk Wega	0,0131 • t	38

6. Ocena zaproponowanej metody i wnioski

Na podstawie zaproponowanych modeli, uzyskano wyniki prognozowanych trwałości (tabl.4).

Różnią się one w poszczególnych modelach choć zbliżone do siebie. Na ich podstawie nasuwają się następujące wnioski. Zaproponowane w pracy modele trwałości mogą stanowić użyteczne narzędzie do szacowania trwałości materiałów budowlanych. Podobieństwo wyników sprzyja ich alternatywnemu korzystaniu. Znając wytrzymałości i gęstości materiałów można korzystać z modelu wytrzymałościowego.

Tablica 4.

Lp	Rodzaj materiału	TRWAŁOŚĆ [lata] W oparciu o model		TRWAŁOŚĆ Prognoz.[lata]
		WYTRZYMAŁOŚCIOWY	MASOWY	ŚREDNIA
1.	Cegła ceramiczna	35	33	34
2.	Tynk cem-wap.	20	23	22
3.	Tynk cementowy	24	29	27
4.	Tynk Ytong	27	19	23
5.	Tynk „Euromix" 3.02	28	29	29
6.	Tynk „Wega"	30	38	34

Dysponując porowatością i wytrzymałością można używać modelu masowego. Modele te nie wydają się być jednak uniwersalnym dla wszystkich materiałów. Pewne różnice wyników oraz wprowadzane w trakcie analiz korekty, świadczą o konieczności ich doskonalenia. Dotyczy to w szczególności stosowanych współczynników środowiskowych, a także wartości dopuszczalnych spadku wytrzymałości i ubytków masy dla różnych materiałów. Przykładowo w materiałach o niskiej wytrzymałości takich jak: beton komórkowy, gips, tynk wapienny i cementowo-wapienny, roczne ubytki masowe znacznie przekraczają w/w wartość graniczną. Przyjęta metoda, jakkolwiek użyteczna, wymaga oczywiście kontynuacji badań w celu ich doskonalenia.

Literatura

[1] Mikoś J., Nowak H.A, Bochen J., Andreasik M.: „Badania odporności materiałów budowlnych w warunkach przyśpieszonego starzenia" – Materiały Budowla. 12/98

[2] Bochen J., Spychała J.: „Badania trwałości wybranych materiałów ścian zewnętrznych w warunkach przyśpieszonego starzenia" Praca badawcza wykonana dla PPHU "THERMO – DOM" w roku 1997.

[3] Bochen J., Nowak H. A., Andreasik M: „Beschleunigte Alterungstests von Aussenputzen zur Prognose der Dauerhaftigkeit"; 5th International Colloguium „Materials Science and Restoration 99" Esslingen, Germany 11/12.1999,

[4] PN-85/C-89037. Metody badań odporności na starzenie. Tworzywa sztuczne.

[5] PN -88/B - 06250 „Beton zwykły",

[6] PN-91/B-10105. Masy tynkarskie do wykonywania pocienionych wypraw elewacyjnych .Wymagania i budowa.

[7] Ściślewski Z.: „Zasady projektowania budynków i budowli z uwzględnieniem trwałości. ITB Warszawa 1994.

[8] Ściślewski Z: „Trwałość konstrukcji żelbetowych", ITB Warszawa 1995.

[9] Sarja A., Vesikari E.: „Durability design of concrete structures" Rilem Report 14.

[10] Mikoś J.: „Związki fizyczne struktury porowatości z cechami betonu cementowego", Politechnika Śląska, Zeszyt Nauk. nr 618, Gliwice 1979.

[11] Nowak H.A.: „Zależności wytrzymałości zaczynów gipsowych od średniego promienia porów ich mikrostruktury". Praca doktorska, Gliwice 1978.

AN EVALUATION METHOD OF RENDERING MATERIALS DURABILITY BASED ON ACCELERATED AGEING TEST

Summary

A method of accelerated ageing test of different external renderings is presented. For the description of durability two models have been proposed. One of this is based on the changes of weightloss and the other on the changes of strength. Both models can be used for prognosis of durability of external renderings.