

Andrzej M. BRANDT

## TRWAŁOŚĆ OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH A ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ

### 1. Zrównoważony rozwój

Postulat zrównoważonego rozwoju stał się powszechny po ogłoszeniu w ONZ w 1987 roku raportu „World Commission on Environment and Development” przez dr Gro Harlem Brundtland, pełniącą funkcję premiera Norwegii. W swobodnym tłumaczeniu ten postulat można wyrazić następująco:

*„Rozwój mający na celu zaspokojenie aspiracji rozwojowych obecnego pokolenia z zachowaniem możliwości zaspokojenia tych samych aspiracji przez przyszłe pokolenia”.*

Zawarta w tym wizja rozwoju uwzględnia zarówno populację ludzką, jak i świat zwierząt i roślin, ekosystemy, zasoby naturalne Ziemi: wodę, powietrze, surowce energetyczne, a więc w sposób zintegrowany traktuje najważniejsze wyzwania stojące przed naszą cywilizacją.

Wymaganie zrównoważonego rozwoju dotyczy wszystkich obszarów gospodarki. W 1992 roku opublikowano z inicjatywy ONZ program wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju pod nazwą Agenda 21, w którym punkt 7 „Promowanie trwałego i zrównoważonego rozwoju osiedli ludzkich” obejmuje różnego rodzaju obiekty budowlane mieszkalne i przemysłowe, również związane z transportem, zaopatrzeniem w media, itd.

Budownictwo jest dziedziną, w której wykorzystywana jest znaczna część energii, wytwarzanej na świecie, zarówno przy wznoszeniu budowli, jak i podczas ich eksploatacji. Także poważna ilość zanieczyszczeń powstaje przy produkcji materiałów budowlanych, a zwłaszcza cementu, np. przemysł budowlany odpowiada za 7% światowej emisji CO<sub>2</sub>, Mora [1]. Z drugiej strony, różnego rodzaju odpady przemysłowe mogą być spożytkowane w obiektach budowlanych, aby zmniejszyć zużycie surowców naturalnych. Jeżeli uwzględnić możliwość ograniczeń w wykorzystywaniu terenu, szczególnie w regionach o wyjątkowych walorach przyrodniczych, to okaże się, jak wiele aspektów zrównoważonego rozwoju zależy od właściwie rozwijanego budownictwa i jak wiele można osiągnąć przez racjonalne projektowanie i eksploataowanie obiektów budowlanych, a bez ograniczania ich walorów użytkowych, bezpieczeństwa i komfortu.

Wiele wymagań, wynikających ze zrównoważonego rozwoju, może być kierowanych do budownictwa i tylko jednym z nich, ale ważnym, jest poprawa trwałości obiektów budowlanych. Jest oczywiste, że zastąpienie obiektu, który okazał się nietrwały, wymaga zużycia dodatkowych ilości materiałów i energii, podobnie jak zbyt częste i poważne naprawy czy remonty. Obiekt, który spełnia swoje podstawowe funkcje przez 50 lat, okazuje się znacznie oszczędniejszy od podobnego, który trzeba wymienić dwukrotnie w tym samym

okresie lub intensywnie naprawiać. Poprawa trwałości prowadzi nie tylko do ograniczenia wpływu na środowisko przy wznoszeniu obiektu, ale także do zmniejszenia kosztów utrzymania i zwiększenia bezpieczeństwa użytkownika.

Tematem referatu jest projektowanie trwałości konstrukcji jako elementu zrównoważonego rozwoju w budownictwie, przy uwzględnieniu różnych aspektów, zarówno technicznych, jak i nietechnicznych.

## 2. Trwałość jako kryterium jakości

Trwałość budowli jest obecnie tematem często podejmowanym bezpośrednio lub pośrednio w pracach badawczych, w referatach i dyskusjach na konferencjach. Dzieje się tak w wielu krajach uważanych za zaawansowane technicznie. Wynika to z powszechnej oceny, że trwałość obiektów budowlanych jest niedostateczna i nie odpowiada przewidywaniom ani możliwościom. Prowadzi to do nadmiernych kosztów napraw i remontów, które obciążają właścicieli (osoby i firmy, gminy, regiony czy państwa), a także do uciążliwych zakłóceń w normalnej eksploatacji [2], [3]. Znaczne nakłady ponoszone są przez inwestorów na remonty (np. w USA 70% nakładów na budownictwo), a wobec tego środki pozostaje na nowe obiekty. Częste i długotrwałe naprawy konstrukcji konieczne są także w Polsce. Na przykład, mimo spektakularnego rozwoju współczesnych odmian betonów wysokowartościowych, okazuje się, że konstrukcje betonowe ulegają szybkiemu zniszczeniu, zwłaszcza poddane działaniu czynników klimatycznych. Wystarczy obejrzeć w Warszawie niektóre wiadukty i kładki dla pieszych ponad ulicami – niemal wszystkie były remontowane po kilku latach użytkowania i teraz znowu wymagają napraw lub nawet wymiany.

Trwałość określana jest jako zdolność konstrukcji to spełniania minimum swoich funkcji przez okres planowanego użytkowania i w przewidzianych warunkach, bez konieczności ponoszenia nadmiernych kosztów napraw i konserwacji. Okazuje się, że mamy wszystkie możliwości, aby takie budowle tworzyć. Co więcej, takie możliwości istniały już wiele wieków wcześniej, o czym przekonują zabytkowe obiekty inżynierskie, np. budowane w czasach panowania Rzymu. Jednym z narzędzi zarządzania obszernym imperium z Rzymu był system niezawodnych dróg, które częściowo istnieją do dzisiaj, zwykle pokryte późniejszymi warstwami. Innym przykładem są rzymskie budowle związane z zaopatrzeniem w wodę, a także takie obiekty, jak teatry i cyrki. Okazuje się przecież, że od strony składu chemicznego i struktury, betony stosowane przez Rzymian niewiele różnią się od produkowanych współcześnie.

Trwałość wiąże się także z pojęciem niezawodności w odniesieniu do obiektów budowlanych, które obejmuje zarówno bezpieczeństwo, jak i użyteczność, co może być wykorzystane w powszechnie przyjętej metodzie projektowania konstrukcji w stanach granicznych. Oba te pojęcia – trwałość i niezawodność – dotyczą określonego okresu użytkowania, ponieważ wymagania użytkowe i inne ulegają zmianom w czasie.

Oprócz wprowadzonych do norm tych dwóch stanów granicznych, konieczne okazuje się uwzględnienie stanu granicznego wynikającego z wymagań trwałości.

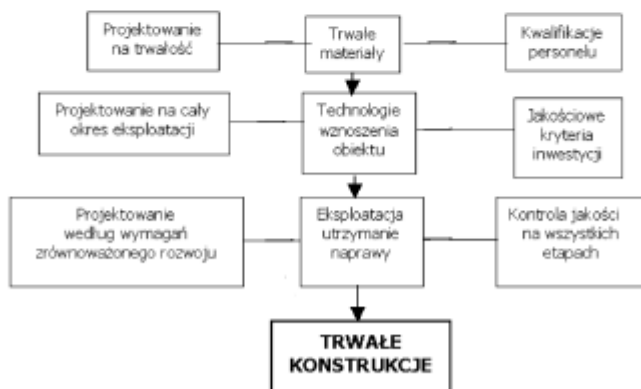
Trwałość budowli można rozpatrywać jako dążenie zarówno do zapewnienia okresu pełnej eksploatacji w normalnych warunkach i w określonym czasie, jak też do uniknięcia katastrof i uszkodzeń wynikających z niedostatecznej trwałości, np. w wyniku kontynuacji użytkowania, mimo występujących oznak zużycia elementów konstrukcyjnych (przykład tamy w Nowym Orleanie, USA, w 2005 r.). Zagadnienia bezpieczeństwa i katastrof nie są w artykule bezpośrednio uwzględnione.

Na rys. 1 pokazany jest schemat, na którym widać wiele grup zagadnień związanych z trwałością konstrukcji. W referacie ze względu na powszechną wiedzę na temat trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji tylko niektóre zagadnienia są rozpatrzone bardziej szczegółowo.

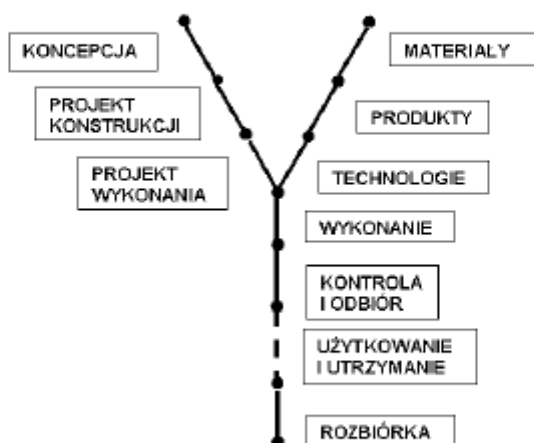
### 3. Projektowanie konstrukcji na cały okres użytkowania

Konstrukcje projektowane są tak, aby spełnić wymagania przed wystąpieniem jednego z dwóch podstawowych stanów granicznych: bezpieczeństwa konstrukcji i jej użyteczności. Oznacza to, że nie mogą wystąpić sytuacje, w których konstrukcja jest niedostatecznie wytrzymała lub niestateczna, a także w których pojawiają się objawy uniemożliwiające użytkowanie zgodnie z przeznaczeniem, np. nadmierne ugięcia, zbyt szerokie rysy, czy nawet niedopuszczalne zmiany wyglądu zewnętrznego. Wymagania te dotyczą całych konstrukcji, elementów konstrukcyjnych i obiektów w trakcie wznoszenia i rozbiórki. Na rys. 2 widać schemat kolejnych operacji obejmujący kolejne etapy od powstania koncepcji obiektu do zakończenia użytkowania. Widać z tego schematu, że te czynności układają się w rodzaj łańcucha – poszczególne operacje są zależne od poprzednich, a o wartości użytkowej obiektu może decydować ta z nich, która została najgorzej zrealizowana.

Planowanie inwestycji obejmuje wszelkie szczegóły przyszłego funkcjonowania budowli, z których wynikają potrzebne kształty i rozmiary zapewniające wytrzymałość, stateczność i funkcjonalność. Wymagania z tym związane podane są w normach i przepisach obowiązujących w różnym zakresie. Wszystkie te wymagania stanowią podstawę projektowania, określania kosztów, kontrolowania wykonywania i odbioru budowli, a także sposobów jej wykorzystywania. Natomiast w obecnie obowiązujących normach w wielu krajach brakuje określenia wymaganej trwałości; w większości przypadków odróżnia się tylko budowle przewizoryczne od trwałych, Somerville [4]; np. w Polsce trwałość różnych rodzajów budowli drogowych i mostowych jest wyrażona liczbą lat w rozporządzeniach resortowych ministrów ([5] i nowelizacje). Okres eksploatacji zwykłych konstrukcji przyjmowany jest na 50 lat. Te wymagania nie są jednak bezpośrednio uwzględniane w projektowaniu ani wymagane przez inwestora, tzn. nie projektuje się na określoną trwałość.



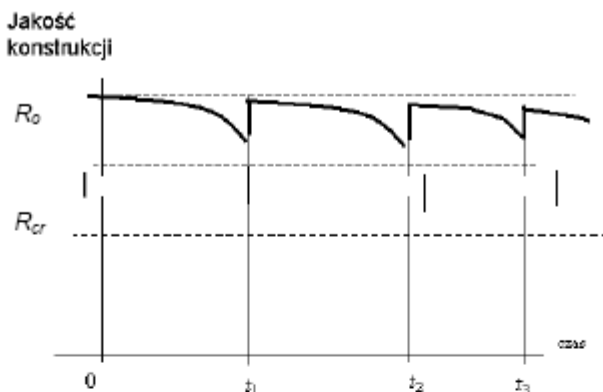
Rys. 1. Schemat grup zagadnień związanych z trwałością konstrukcji



Rys. 2. Kolejność operacji w okresie budowy i użytkowania obiektu wg Marsh i Nixon [6]

Nieznane są przypadki rozbiórki budowli ze względu na upływ czasu, na który była projektowana i wykonana. Zupełnie odmiennie sytuacja wygląda na przykład, w przemyśle lotniczym: silniki i samoloty mają określoną liczbę godzin pracy, której nie można przekroczyć – po tym okresie eksploatacji muszą być przekazane na złom. Trudno sobie wyobrazić obecnie zupełnie analogiczną sytuację w budownictwie, ale pojedyncze przypadki wskazują, że można formułować i realizować podobne wymagania. Na przykład budowane w latach 90. poprzedniego stulecia mosty i tunele przez cieśniny duńskie były projektowane na 150 lat, słynny wiadukt w Millau w południowej Francji, oddany do użytkowania w grudniu 2004 r. – na 120 lat. Projektanci i wykonawcy musieli w obu tych przypadkach udowodnić wymaganą trwałość przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Podobne wyjątkowe sytuacje zachodzą także w obiektach przeznaczonych do składowania odpadów radioaktywnych. Okazuje się, że projektowanie na określony okres użytkowania jest możliwe, a stosowane w rozsądnym zakresie mogłoby stać się sposobem poprawienia trwałości wszystkich konstrukcji, nie tylko tych wyjątkowych.

Jeżeli uważa się za trwale wszystkie konstrukcje, które nie są *explicite* określone jako tymczasowe, to nie można się dziwić, że w wyniku różnych procesów trwałość wielu budowli okazuje się niedostateczna. Dotyczy to w największym stopniu obiektów narażonych na bezpośrednie oddziaływania klimatyczne, a więc wszystkich mostów i konstrukcji hydrotechnicznych, nawierzchni dróg itd., ponieważ oddziaływania na takie obiekty wykazują zmiany intensywności w czasie wieloletniego użytkowania, są w normach określone w sposób przybliżony i często niedostatecznie ocenione jest ich łączne występowanie itp.



Rys. 3. Podtrzymywanie jakości konstrukcji w czasie użytkowania

Trwałość decyduje o długości okresu czasu, który jest celem powstania budowli, a na rys. 2 oznaczony jest jako użytkowanie i utrzymanie.

Potrzebna jest zasadnicza zmiana, polegająca na projektowaniu budowli na cały okres przewidywanego użytkowania wraz z kosztami utrzymania, koniecznych napraw, a nawet rozbiórki (*ang. life cycle design*). Całkowity okres użytkowania obejmuje kolejne i wzajemnie powiązane etapy - od pozyskania surowców naturalnych, przez planowanie i realizację budowy i jej eksploatację, aż do ich końcowej likwidacji.

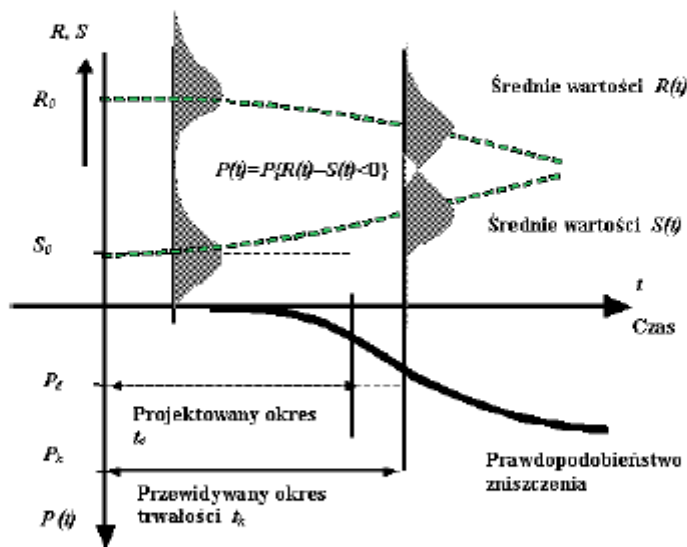
Gdy rozpatruje się cały okres użytkowania, okazuje się, że konstrukcje zaprojektowane i wykonane nieco drożej okazują się tańsze po uwzględnieniu zmniejszonych kosztów napraw i poprawy warunków eksploatacji. Proces przywracania wymaganej jakości konstrukcji można przedstawić w znany sposób, jak na rys. 3 (por. Sarja [7]). Po upływie czasu  $t_1$  wartość początkowa  $R_0$ , określająca jakość konstrukcji, obniżyła się do takiego poziomu, że aby nie doprowadzić do wartości krytycznej  $R_{cr}$ , przeprowadzono naprawę, podwyższając jej jakość. W kolejnych naprawach po upływie czasów  $t_2, t_3, \dots$  wykonywano naprawy, utrzymując jakość pomiędzy pierwotną wartością  $R_0$  a wartością krytyczną  $R_{cr}$ . Zwykle po kilku takich etapach naprawy stają się coraz mniej skuteczne i bardziej kosztowne, co prowadzi do zakończenia użytkowania konstrukcji. W tym przykładzie jakość może być określana w sposób wymierny, np. przez nośność, która maleje wraz z postępem zużycia, albo przez szacunkową ocenę, np. wyglądu zewnętrznego elewacji, która pokrywa się naciękaniami lub rysami.

Przewidywany rozwój w czasie ogólnie oznaczonych obciążeń  $S(t)$  i wytrzymałości  $R(t)$  wraz z rozrzutami ich wartości oraz prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji  $P(t)$  przedstawiono schematycznie na rys. 4, ISO [8], na którym wzdłuż osi poziomej biegnie czas eksploatacji konstrukcji  $t$ . Górna część to wykresy średnich wartości obciążeń  $S(t)$  i nośności  $R(t)$  w czasie, wraz z funkcjami gęstości prawdopodobieństwa ich zmienności. Oczekiwane jest spełnienie warunku bezpieczeństwa w postaci nierówności

$$R(t) > S(t) \quad (1)$$

w obu stanach granicznych zniszczenia i użyteczności. Jednakże, ponieważ wszystkie obciążenia i ich skutki w konstrukcji oraz wytrzymałości i parametry geometryczne konstrukcji są to wielkości losowe, charakteryzowane przez rozrzuty swoich wartości, to zależność (1) sprowadza się do nierówności która oznacza, że prawdopodobieństwo  $P_f(t)$  wystąpienia takiej sytuacji  $S(t)$  jest większe od  $R(t)$ , jest mniejsze od akceptowanej wartości  $P_k$ . Na rys. 4 pole wspólne rozrzutu obu wielkości  $R(t)$  i  $S(t)$  odpowiada właśnie takiemu prawdopodobieństwu przekroczenia stanu granicznego w przewidzianym okresie użytkowania. Wartość  $P_k$  powinna być określona po uwzględnieniu rodzaju budowli, znaczenia wystąpienia rozważanego stanu granicznego, skutków społecznych i ekonomicznych itd. Można jako skrajne przykłady przytoczyć monumentalny budynek w centrum miasta i prowizoryczny barak, a także zawalenie się budynku i wystąpienie nieestetycznych plam na elewacjach. Średnie wartości  $R(t)$  maleją w czasie użytkowania, a średnie wartości  $S(t)$  rosną; są to zmiany potwierdzone przez wieloletnie obserwacje i pomiary w rozmaitych obiektach.

$$P_f(t) = P\{R(t) - S(t) < 0\} < P_k \quad (2)$$



Rys. 4. Prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji w czasie, wg [7]

W przewidywanym okresie trwałości  $t_k$  prawdopodobieństwo wystąpienia stanu granicznego konstrukcji wynosi  $P_k$ , zaś konstrukcja jest projektowana tak, aby w okresie  $t_d$ , na który konstrukcja jest projektowana, przy czym  $t_k > t_d$ , odpowiednie prawdopodobieństwo wynosiło tylko  $P_d$ , a  $P_d < P_k$ .

#### 4. Projektowanie na trwałość w półprobabilistycznej metodzie stanów granicznych

Stosując powszechnie znaną w projektowaniu konstrukcji metodę stanów granicznych, trzeba określić projektowany okres  $t_d$  eksploatacji budowli, wynikający na przykład z zamiarów inwestora, rodzaju budowli itd.

Następnym etapem jest wyznaczenie charakterystycznego (przewidywanego) okresu trwałości  $t_k$  przez uwzględnienie danych statystycznych i analizy prawdopodobieństwa występowania w takim zadaniu wszystkich zmiennych losowych i ich intensywności, przy czym okres przewidywanej trwałości  $t_k$  jest większy niż okres projektowanego użytkowania  $t_d$ .

W przypadku projektowania wytrzymałości i nośności pod danymi obciążeniami stosować można znaną metodę półprobabilistyczną, polegającą między innymi na wprowadzeniu nominalnych wartości obciążeń lub na uwzględnieniu nieznanych rozkładów statystycznych wielkości występujących w takim zagadnieniu przez odpowiednie częściowe współczynniki. Współczynniki takie wobec braku dostatecznych danych statystycznych mogą być wyznaczone na podstawie doświadczenia lub w inny szacunkowy sposób [9], [10]. Uwzględnienie trwałości w tej metodzie proponowane jest różnymi metodami.

Stosując w sposób analogiczny półprobabilistyczną metodę stanów granicznych, projektowany okres  $t_d$  może być wyrażony zależnością [11], [12]:

$$t_d = t_k / \gamma_t \quad (3)$$

gdzie:  $t_k$  - charakterystyczny (przewidywany) okres trwałości budowli,  
 $\gamma_t$  - współczynnik, zwykle większy od jedności, będący iloczynem częściowych współczynników:

$$\gamma_t = \gamma_{t1} \cdot \gamma_{t2} \cdot \gamma_{t3} \cdot \gamma_{t4} \cdot \gamma_{t5} \cdot \gamma_{t6} \cdot \gamma_{t7} \dots \dots \quad (4)$$

Częściowe współczynniki mają na celu szacunkowe uwzględnienie podstawowych czynników wpływających na odmienne od przewidywanego zachowanie się budowli w czasie. Przykładowo współczynniki takie mogą uwzględniać następujące okoliczności:

- $\gamma_{t1}$  - znaczenie budowli i konsekwencje wystąpienia stanu granicznego,
- $\gamma_{t2}$  - jakość projektowania i wymiarowania (niepewność przyjętych modeli),
- $\gamma_{t3}$  - jakość wykonawstwa i kontroli na budowie,
- $\gamma_{t4}$  - właściwości warunków wewnątrz budowli,
- $\gamma_{t5}$  - właściwości warunków zewnętrznych,
- $\gamma_{t6}$  - sposób użytkowania, np. możliwość wystąpienia innych obciążeń,
- $\gamma_{t7}$  - przewidywana jakość utrzymywania budowli.

Zależnie od okoliczności można powiększać liczbę częściowych współczynników, aby uwzględnić różne lokalne warunki i wymagania. Zwykle wartości współczynników powinny być większe lub równe jedności, podobnie jak w przypadku projektowania wytrzymałości konstrukcji. Znane są inne metody określania współczynnika  $\gamma_t$ , np. według Sarja i Vesikari [13], przy określeniu oczekiwanego poziomu niezawodności i statystycznego rozkładu degradacji. Zmienia to sposób postępowania przy projektowaniu, ale pozostaje koncepcja wymaganej trwałości przy określonym prawdopodobieństwie powstania stanu granicznego.

Przy stosowaniu częściowych współczynników może okazać się na przykład, że w przypadku obiektu projektowanego i wykonywanego przez renomowane firmy, przy braku zagrożenia czynnikami korozyjnymi, przewidywany okres trwałości niewiele różni od wymaganego przez inwestora okresu eksploatacji. Natomiast budowla narażona na niedokładnie roz-

poznane czynniki agresywne powinna być wykonana i zabezpieczona na okres znacznie dłuższy od projektowanej. Na przykład konstrukcja projektowana na  $t_d = 50$  lat powinna mieć zdolność zachowania trwałości przez okres  $t_k = 70$  lub w drugim przypadku przez 90 lat.

Opisany sposób określania wymaganej i projektowanej trwałości budowli wprowadza zmiany sposobu formułowania założeń przez inwestora i odpowiedniego ich realizowania przez projektanta. Konieczne jest uwzględnienie okoliczności, że rosnące wymagania trwałości powodują wzrost pierwszego kosztu, natomiast koszt całkowity takich obiektów, obejmujący także utrzymanie i naprawy, może być znacznie niższy.

Działanie czynników agresywnych może być wprowadzone do metody stanów granicznych w sposób analogiczny do efektów obciążeń. Należy wówczas określić decydujące w danym przypadku działanie agresywne i wyznaczyć charakterystyczny okres czasu  $T_k$ , w którym doprowadzi ono do powstania stanu granicznego. Aby wyznaczyć projektowany okres czasu  $T_d$ , należy  $T_k$  podzielić przez odpowiedni współczynnik [11, 12]:

$$T_d = T_k / \gamma_d \quad (5)$$

gdzie:

$T_k$  - charakterystyczny okres czasu, po którym rozpatrywane działanie agresywne doprowadzi do stanu granicznego zniszczenia lub utraty użyteczności, wartość tę można określić na podstawie wyników badań doświadczalnych lub obserwacji obiektów;

$\gamma_d$  - współczynnik, zwykle większy od jedności, który ma uwzględnić wpływ różnych czynników losowych, szacowanych na podstawie doświadczenia i obserwacji podobnych konstrukcji.

Współczynnik  $\gamma_d$  może być wyznaczony jako iloczyn częściowych współczynników, wyrażających wpływ różnych czynników, szacowanych oddzielnie dla ułatwienia:

$$\gamma_d = \gamma_{d1} \cdot \gamma_{d2} \cdot \gamma_{d3} \cdot \gamma_{d4} \dots \quad (6)$$

Na przykład w przypadku przyjęcia karbonatacji betonu i korozji stali zbrojeniowej jako działania agresywnego, a dotarcie tego procesu aż do prętów zbrojenia jako stan graniczny trwałości, częściowe współczynniki mogą wyrażać:

$\gamma_{d1}$  - grubość otuliny stali zbrojeniowej względem wartości normowej,

$\gamma_{d2}$  - prawdopodobieństwo zapewnienia jednakowej grubości otuliny,

$\gamma_{d3}$  - szczelność betonu otuliny,

$\gamma_{d4}$  - możliwość wystąpienia rys i mikrorys ułatwiających karbonatację.

Wszystkie te czynniki mają charakter losowy, ale wobec nieznanności rozkładów statystycznych tych wielkości trzeba zastosować wartości szacunkowe współczynników  $\gamma_{di}$  i wyznaczyć na podstawie doświadczenia, obserwacji podobnych konstrukcji itp. W miarę uzyskiwania danych o rozkładzie prawdopodobieństwa jest celowe wykorzystywanie ich do oceny poszczególnych zjawisk.

Warunkiem trwałości budowli ze względu na rozpatrywane oddziaływanie agresywne jest spełnienia nierówności:

$$T_d > t_d, \quad (7)$$

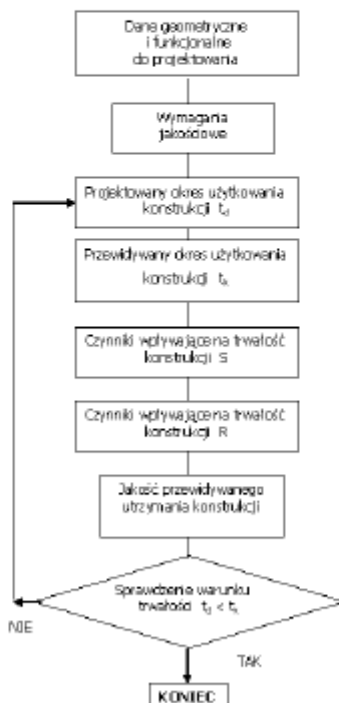
co oznacza, że okres czasu, zanim oddziaływanie agresywne spowoduje wystąpienie określonego stanu granicznego, jest dłuższy od projektowanego okresu eksploatacji budowli. Wówczas trwałość budowli jest zapewniona z prawdopodobieństwem wynikającym z przyjętych wartości współczynników lub z rozkładów prawdopodobieństwa wystąpienia i intensywności oddziaływań.



Jeżeli możliwe jest występowanie kilku oddziaływań agresywnych, to można albo rozpatrywać je kolejno, albo uwzględnić ich wzajemne relacje, np. w sensie przyspieszania agresywnych procesów. W pierwszym przypadku okaże się, które z rozpatrywanych oddziaływań prowadzi w najkrótszym czasie do wystąpienia stanu granicznego. W drugim przypadku – potrzebne jest zbudowanie odpowiedniego modelu, uwzględniającego łączne występowanie dwóch lub więcej oddziaływań.

Przedstawiony powyżej półprobabilistyczny schemat uwzględnienia trwałości w projektowaniu może być rozmaicie rozwijany i rozbudowywany. Postulowane jest więc wprowadzenie odrębnego stanu granicznego trwałości. Można bowiem uważać, że stan graniczny trwałości odpowiada inicjacji procesu prowadzącego do wystąpienia któregoś z dwóch stanów granicznych. Oznacza to, że w tym stanie inicjacji (*initiation durability state*) nie jest jeszcze zagrożona wytrzymałość ani użytkowalność, ale konstrukcja przestała być trwała, ponieważ rozpoczął się proces prowadzący do jednego z tych stanów. Aby przywrócić trwałość, trzeba w tym okresie zastosować odpowiednie środki zaradcze i przerwać proces niszczenia.

Schemat blokowy sprawdzania trwałości konstrukcji, niezależny od przyjętej metody, pokazany jest na rys. 5, Niraki [14].



Rys. 5. Schemat blokowy sprawdzania trwałości konstrukcji, wg Niraki [14]

## 5. Trwałość materiałów

Pojęcie trwałości materiałów jest używane potocznie, chociaż nie jest ściśle. Trwałość budowli, konstrukcji lub elementu może być określona w wymaganiach przy rozpoczynaniu procesu inwestycyjnego lub oceniana w odniesieniu do istniejących obiektów, natomiast materiały wykazują zmienność właściwości w czasie w wyniku starzenia i oddziaływania różnych czynników. Znaczenie zmian tych właściwości zależy od przeznaczenia danego materiału, sposobu wykorzystania w konstrukcji, a przede wszystkim od rodzaju konstrukcji. Ten sam materiał o charakterystycznym rozwoju właściwości w czasie może być właściwy do wykonania danej konstrukcji, a całkowicie nieodpowiedni do innej. Przyjęto jednak mówić o trwałości materiałów budowlanych, rozumiejąc właśnie tę zmienność.

Trwałość podstawowych materiałów konstrukcyjnych w zależności od ich rodzaju, jakości i warunków jest tematem wielu książek, publikacji i badań. Opisanie nawet tylko elementarnych wiadomości na temat czynników agresywnych wobec różnych konstrukcji przekroczyłoby zakres referatu. Wystarczy tu zaznaczyć, że zastosowanie materiałów o trwałości odpowiadającej co najmniej przewidywanemu okresowi użytkowania budowli jest podstawowym wymaganiem, podobnie jak systematyczna kontrola zmian zachodzących pod wpływem czasu i zmiennych warunków użytkowania, np. wskutek zmiany funkcji obiektu.

Szczególne znaczenie ma określenie początku zniszczenia w materiałach i elementach konstrukcyjnych, ponieważ wiele procesów zapoczątkowanych prowadzi do zniszczenia niemal bez możliwości ich zatrzymania w sposób skuteczny i ekonomiczny. Dotyczy to na przykład rozmaitych procesów korozyjnych. Stąd koncepcja powiązania stanu granicznego trwałości nie z określonym umownie stopniem czy zakresem uszkodzenia elementu konstrukcyjnego, a z inicjacją procesu niszczenia, który prowadzi w sposób niemiunikny do wystąpienia jednego z dwóch tradycyjnych stanów granicznych. Zagadnienie to szczegółowo zostało opisane w publikacjach Melta [15], a także w [9] - [12].

## 6. Kwalifikacje personelu

Wymaganie wysokiej kwalifikacji personelu na wszystkich etapach projektowania i wznoszenia budowli jest coraz bardziej aktualne wobec rozwoju nowych materiałów i technologii. Jeżeli przykładowo rozpatrzeć wykonywanie betonów wysokowartościowych (BWW), samozagęszczalnych czy nawet zwykłych napowietrzonych, stosowanie stali antykorozyjnych lub konstrukcji zespolonych, to okazuje się, że przygotowanie personelu projektującego i wykonującego w wielu przypadkach jest niewystarczające. Postulat doskonalenia zawodowego i świadectw przygotowania do poszczególnych prac jest podnoszony w wielu opracowaniach w krajach najbardziej rozwiniętych [16], [17]. Świadectwa wymagane od dawna tylko od spawaczy i operatorów sprzętu są także potrzebne na innych stanowiskach robotniczych. Funkcje kierownicze i kontrolne powinny być wykonywane przez osoby znające niekonwencjonalne materiały i technologie, na przykład związane ze wspomnianym betonem samozagęszczalnym i fibrobetonem, a może być potrzebne nawet ustalenie systemu łączności ze specjalistycznym laboratorium w celu konsultacji w razie nagłych i nietypowych trudności.

System zapewnienia i kontroli jakości (*Quality Assurance/Quality Control*) jest niezbędnym w budownictwie i coraz częściej taka konieczność jest uznawana. Znaczenie tego systemu występuje szczególnie wyraźnie przy stosowaniu zaawansowanych technologii i materiałów, ponieważ użycie odpowiednich metod, a następnie sposobów eksploatacji decyduje o jakości i trwałości.

## 7. Kryteria jakości w inwestowaniu

Już podczas planowania inwestycji występują przyczyny niedostatecznej trwałości, które można traktować jako nietechniczne. Są to decyzje przy wyborze rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych i organizacyjnych, które określają końcową jakość budowli. Najczęściej niewłaściwe decyzje są podyktowane względami oszczędności i przyspieszenia prac, a przez to ograniczenia kosztu inwestycji, ale czasami także wynikają z niekompetencji.

W etapie planowania często występują istotne przyczyny zmniejszonej trwałości konstrukcji determinujące jakość przyjętych rozwiązań, a wynikające z ograniczania kosztu tych pozycji, które wydatkowane są od początku aż do oddania budowli do użytkowania (*first cost*), natomiast nie są uwzględniane koszty utrzymania, napraw, okresowego wyłączenia z użytkowania podczas napraw, a także zwiększonego ryzyka wystąpienia stanów granicznych nośności, użytkowości lub trwałości. Ten ostatni aspekt niemal nigdy nie jest brany pod uwagę, a analiza ryzyka (*risk analysis*) w budownictwie jest dopiero rozwijana w opracowaniach naukowych, chociaż jest już niezbędnym narzędziem przy wyborze rozwiązań w innych dziedzinach, np. w transporcie, telekomunikacji, informatyce.

Przykłady zbyt oszczędnego (w sensie „pierwszego kosztu”) planowania inwestycji i projektowania budowli stają się widoczne podczas analizowania przyczyn wielu awarii budowlanych i wskazują na pozorne oszczędności. Można tu wymienić najczęstsze przyczyny:

- wybór najtańszych oferentów podczas przetargów na poszczególne etapy inwestycji, bez dostatecznego uwzględnienia innych argumentów, np. wielkości i renomy przedsiębiorstwa, jego sytuacji finansowej;
- rozbudowane systemy podwykonawców poszczególnych rodzajów robót, które utrudniają kontrolę jakości i określenie odpowiedzialności;
- poszukiwanie nadmiernych oszczędności planowanej budowy, począwszy od projektowania przyspieszonego w stosunku do realizacji, przez zbyt szybkie wykonywanie poszczególnych etapów, np. przenoszenie rusztowań przed uzyskaniem dostatecznej wytrzymałości betonu, aż do rezygnowania z nadzoru autorskiego na budowie;
- stosowanie nowoczesnych rozwiązań głównie w celach reklamowych, a bez uwzględnienia koniecznych wymagań technologicznych i technicznych, np. użycie betonów wysokowartościowych bez odpowiedniej pielęgnacji, stosowanie uzbrojenia włóknami przy zbyt małej ich ilości; w ogólności - niedostateczne przygotowanie personelu do realizowania nowoczesnych, ale trudniejszych technologii.

Wymienione oszczędności są związane z konkurencją na rynku budowlanym, która jest niewątpliwie zjawiskiem normalnym i korzystnym, ale musi być spełniony warunek podstawowy, że o uzyskaniu zamówienia decyduje nie tylko wspomniany „pierwszy koszt”.

Oczekiwanie wysokiej jakości budowli i trwałości przy daleko idących oszczędnościach na różnych etapach procesu budowlanego nie jest uzasadnione i najczęściej nie jest spełnione. Szczególne znaczenia nabierają w takich sytuacjach ludzkie błędy i pomyłki prowadzące do zmniejszenia trwałości, a często do awarii konstrukcji, Kucharska [18].

## 8. Normy i zalecenia w budownictwie

Wszystkie etapy projektowania i wykonywania obiektów budowlanych są objęte normami. Normy te, niezależnie od ich formalnego statusu – obowiązujące jako prawo czy nieobowiązujące – wywierają ogromny wpływ na przebieg i wyniki całego procesu budowlanego. W znakomitej większości normy są utrzymane w konwencji recepturowej (*prescriptive standards*), to znaczy, że zawierają wymagania w postaci zaleceń ilościowych, odnoszących

się do poszczególnych składników betonu i ich proporcji, do jakości stali konstrukcyjnej, do niektórych etapów procesów technologicznych itd. Są one łatwiejsze do stosowania niż normy jakościowe: takie, które zawierają wymagania uzyskania określonych właściwości (*performance standards*). Normy recepturowe istnieją od lat i stanowią trwały element procesu budowlanego, a ich znajomość – niezbędną część wykształcenia i w ogóle przygotowania zawodowego. Jednakże utrudniają wprowadzanie nowych składników i metod i stanowią swego rodzaju hamulec rozwoju i innowacji. Stąd pochodzi powszechny postulat stopniowego przechodzenia od norm recepturowych do norm określających jakość (*prescriptive to performance, P2P*).

Wiele dotychczasowych norm recepturowych zawiera w swojej treści zezwolenie na odejście od wymagań pod warunkiem naukowego uzasadnienia. Nie jest to jednak stosowane w większości przypadków, ze względu m.in. na dodatkowe komplikacje z przygotowaniem takiego uzasadnienia, i wymagania normowe mogą stanowić bezpośrednio i skuteczne ograniczenie nowych technik w budownictwie. Pokonywanie takich wymagań przedłuża wydanie uzyskanie możliwości stosowania nowych materiałów i metod.

Nowe elementy w projektowaniu materiału czy konstrukcji nie są uwzględniane przez istniejące w tej dziedzinie normy recepturowe, a często takie nowości są nawet bezpośrednio poza dozwolonymi granicami. Można argumentować, że pewien konserwatyzm jest potrzebny ze względu na bezpieczeństwo obiektów budowlanych, ale efekt opóźniania innowacji jest niewątpliwym. W obecnym okresie szybkiego rozwoju w budownictwie przejście w jak największym stopniu od norm recepturowych do norm jakościowych jest konieczne. Niestety, nawet najnowsze normy wprowadzane wraz z wejściem Polski do systemu normalizacji w Unii Europejskiej to normy recepturowe w znacznym zakresie, np. PN-EN 206. Bez zasadniczej zmiany w normalizacji trudno będzie uzyskać podstawy do budowy trwałych konstrukcji, spełniających jednocześnie konieczne wymagania ekonomiczne.

Projektowanie na cały okres użytkowania (*life cycle design*) pojawiło się być może po raz pierwszy w dokumencie normalizacyjnym w Japonii w 1988 r. [19] jako zbiór zaleceń, opublikowany po angielsku w 1993 r., a w Wielkiej Brytanii w 1992 r., [20]. Dopiero później wymaganie niezawodności pojawiło się w normach przygotowanych w ISO, a norma [21] została przyjęta w Polsce. W 2004 r. podjęto opracowanie normy ISO [8], w której bezpośrednio sformułowany jest stan graniczny trwałości konstrukcji jako jeden ze stanów granicznych. Norma ta ma trwałość w tytule; można oczekiwać jej publikacji w 2008 roku.

Trwałość konstrukcji nie jest dotychczas ujmowana wprost w normach budowlanych. Trafnie opisał ten stan Thomas w pracy [22]. Ze względu na powszechne kłopoty z trwałością konstrukcji betonowych poświęcono im szczególnie wiele prac, m.in. Mindess [23] już w 1994 r., a dopiero w 2004 r. Sakai i Bulfiza [24]. Szereg norm dotyczących betonu w USA, Kanadzie, a także norma europejska EN 206-1:2000 zawierają na przykład przepisy ograniczające współczynnik  $w/c+m$  (stosunek ilości wody w mieszaninie do masy składników wiążących). Istnieją tam również inne ograniczenia, np. minimalne ilości cementu portlandzkiego i powietrza w formie przepisów recepturowych. Tymczasem badania od kilkunastu lat wskazują na konieczność zasadniczych zmian w składzie betonów, których trwałość jest najważniejsza, a nie tylko wytrzymałość na ściskanie. Chodzi tu głównie o dopuszczenie do użycia różnych drugorzędnych składników, jak tradycyjne pyły dynamiczne i nowe odmiany pyłów z kotłowni fluidalnych, mielone żużle itd. [25]. Wiadomo, że obecność tych składników zamiast części cementu portlandzkiego powiększa odporność na różnego rodzaju czynniki agresywne, których oddziaływanie musi być uwzględniane w projektowaniu trwałych konstrukcji. Powolne uwzględnianie innowacji w materiałach i metodach, ze względu na częściowe nawet istnienie w normach wymagań recepturowych, jest widoczne także

na przykładzie innych składników betonu: brak norm utrudnia stosowanie włókien rozproszonych jako zbrojenia betonu.

Konieczne jest wprowadzenie do norm wymagań zmierzających do zapewnienia trwałości i stopniowe ich doskonalenie w miarę uzyskiwania doświadczenia. Dotyczy to całego budownictwa, a w szczególności konstrukcji inżynierskich, choć celem nie jest wnoszenie budowli o okresie trwałości przekraczającym ich przydatność.

## 9. Zakończenie

Trwałość konstrukcji jest stałym tematem znakomitych prac naukowych, ale niepełnie rozwiązany w praktyce budowlanej. Wymaganie odpowiedniej trwałości budowli jest jednym z elementów zrównoważonego rozwoju.

Zagadnienie trwałości dotyczy wszystkich rodzajów konstrukcji, a może być przykładowo rozpatrywane w odniesieniu do konstrukcji betonowych narażonych na bezpośrednie działanie czynników klimatycznych. Nawet jeżeli określa się trwałość projektowanych budowli, to na ogół nie uwzględnia się tego bezpośrednio w projektowaniu ani nie sprawdza się realizacji. Zamiast projektowania konstrukcji na trwałość, uzyskując wytrzymałość jako wtórny wynik, projektuje się wyłącznie na wytrzymałość. Nadal utożsamia się na przykład jakość betonu z normową wytrzymałością na ściskanie, chociaż nie trzeba tłumaczyć, ile innych własności betonu decyduje o jego wartości w danych warunkach i w danej konstrukcji. Od ilu lat wiadomo, że beton nie może być określony jednym parametrem? A przecież niemal wyłącznie tylko ten parametr pojawia się w obliczeniach, w opisach technicznych i na rysunkach konstrukcyjnych.

Na obecną niezadowalającą sytuację wpływają rozmaite czynniki nietechniczne stwarzające przyczyny uszkodzeń. Są to przede wszystkim często występujące:

- nadmierne oszczędności na kolejnych etapach procesu budowlanego,
- brak systematycznej i kompleksowej kontroli projektowania i wykonawstwa,
- niedostateczne kompetencje personelu na budowach, a także służb utrzymania obiektów.

Prace badawcze zmierzające do lepszego poznania chemicznych i fizycznych zjawisk prowadzących do nietrwałości materiałów budowlanych są potrzebne i powinny być dalej rozwijane. Jednak obecna wiedza w dziedzinie materiałów i technologii budownictwa jest wystarczająca, aby w istotnym zakresie poprawić trwałość konstrukcji. Podstawowe wiadomości znajdują się w powszechnie dostępnych podręcznikach i normach, ale nie są w pełni stosowane. Na przykład w podręczniku Europejskiego Komitetu Betonu z 1989 roku [26] stwierdzono, że umiemy wykonywać trwałe beton, ale tego nie robimy; odnosi się to również do konstrukcji z innych materiałów.

Można przewidywać, że traktowanie całościowo kosztu konstrukcji spowoduje zmiany w znaczeniu kosztu materiału. Jeżeli rozpatrywać koszt konstrukcji wraz z jej utrzymaniem, a nawet rozebraniem po zakończeniu eksploatacji, to wówczas można wykazać, że droższe materiały mogą przynosić oszczędności przez zmniejszenie na przykład kosztu napraw i wydłużenie okresu eksploatacji. Otwiera to nowe perspektywy wprowadzania do praktyki materiałów o wyższych właściwościach i wyższych cenach jednostkowych.

Projektowanie konstrukcji na cały okres eksploatacji (*life cycle design*) będzie w najbliższych latach głównym czynnikiem wymuszającym rozwój badań w dziedzinie materiałów budowlanych, przy zachowaniu oszczędności przedstawianych symbolem  $E^f = energia \times ekologia \times ekonomia$ , Sarja [7]. Takie projektowanie jest jednym z elementów wymagań zrównoważonego rozwoju (*sustainable development*) w dziedzinie budownictwa, Rostam [27]. Można przewidywać, że rozwój podstaw ekonomicznych wnoszenia konstrukcji po-

ciągnie za sobą daleko idące i pozytywne zmiany w budownictwie, wymagające podejmowania nowych kierunków badań w niedługiej przyszłości.

#### Literatura

- [1] Mora E. P., Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*, 42, 2007, 1329-1334.
- [2] The Status of Cement and Concrete R&D in the United States, Publ. National Materials Advisory Board 361, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 1980.
- [3] Concrete Durability: A Multibillion-dollar Opportunity, Publ. National Materials Advisory Board 437, National Academy Press, Washington, D.C. 1987.
- [4] Somerville G., Whole life design for durability and sustainability. Where are we going, and how do we get there? Proc. Int.Conf. „Concrete Durability and Repair Technology”, Thomas Telford, Dundee 1999, 1-19.
- [5] Rozporządzenie Min. Transp. i Gosp. Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, maj 2000.
- [6] Marsh B. K., Nixon P. J., Assuring performance of concrete structures through a durability audit, w: Int.Conf. Concrete in the Service of Mankind. Appropriate Concrete Technology, Dundee 1996, 49-59.
- [7] Sarja A., Integrated Life Cycle Design of Structures, Spon Press, 2002, ss. 142.
- [8] General Principles on the Design of Structures for Durability, ISO 13823:2008 (w druku).
- [9] Brandt A. M., Kucharska L., Współczesne kierunki projektowania trwałości betonu. XVII Konf. "Beton i Prefabrykacja", t.1, Popowo 2000, 109-121.
- [10] Brandt A.M., Kucharska L., New trends in designing the durability of concrete. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. "Concrete under Severe Conditions", N.Banđia red., Vancouver 2001, 797- 810.
- [11] Brandt A. M., Uwagi o trwałości konstrukcji betonowych, Drogi i Mosty, 3, 2004, 5-14.
- [12] Brandt A. M., On the durability of concrete structures, w: Proc.Int.Symp.CanMet'05 and Mindess Symp., Vancouver, sierpień 2005, 441.
- [13] Sarja A., Vesikari E., eds., Durability design of concrete structures. RILEM Report Series 14, E&FN Spon, Vol.VI, 1997, ss. 165.
- [14] Niraki T., Service life design. *Construction and Building Materials*, Vol.10, No 5, 1996, 403-406.
- [15] Mehta P.K., Durability – critical issues for the future. *Concrete International*, July 1997, 27-33.
- [16] Roadmap 2030. The U.S. Concrete Industry Technology Roadmap. Strategic Development Council, December 2002.
- [17] Concrete Technology. Materials Science for Concrete. Workshops 2002, 2003, 2004. Skalny J., Mindess S., Boyd A., red., The American Ceramic Society, 2005, 191 ss.
- [18] Kucharska L., Katastrofy, awarie i uszkodzenia a beton i jego rozwój. XX Konf. „Awarie Budowlane”, Międzyzdroje 2001, 89-118.
- [19] Principal Guide for Service Life Planning of Buildings, Architectural Institute of Japan, Tokyo 1988 (ang. 1993).
- [20] Guide to Durability of Buildings and Building Elements, Products and Components. BS 7543, British Standard Institution, London 1992.
- [21] Ogólne zasady niezawodności konstrukcji, PN-ISO 2394:2000.
- [22] Thomas M. D. A., Code requirements for durability: are they good enough? Proc.Int.Symp.CanMet'05 and Mindess Symp., Vancouver, sierpień 2005, 457.

- [23] Mindess S., Materials selection, proportioning and quality control, w: S.P. Shah and S.H. Ahmed (eds.) *High Performance Concrete and Applications*, Edward Arnold 1994, 1-2.
- [24] Sakai K., Boulfiza M., Durability design of concrete structures. w: George C. Hoff Symposium on High-Performance Concrete for Marine Environment, ed. T.C. Liu, CANMET/ACI Int. Conf., Las Vegas, May 2004.
- [25] Brandt A. M., Glinicki M. A., Effects of pozzolanic additives on long-term flexural toughness of HPGFRC, w: 4<sup>th</sup> Int.Conf. "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites", A.E. Naaman, H.W.Reinhardt (red.), Ann Arbor 2003, 399-408.
- [26] *Durable Concrete Structures*, CEB Bulletin d'Information No 182, 1989.
- [27] Rostam S., Service life of concrete structures. INTEMAC, No 1, 2006, 1-48.

W pracy wykorzystano rysunki i fragmenty tekstu z referatu przedstawionego na Konferencji EKO-MOST w maju 2006 r. w Kielcach, zorganizowanej przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, a następnie opublikowanego w miesięczniku „Autostrady”, 10/2006, 24-33.

## DURABILITY OF BUILDING AND CIVIL ENGINEERING STRUCTURES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

In the paper the definitions of durability of materials and structures, variation of the material properties with time, sustainability and other notions are discussed. The durability of structures as an element of sustainable development is considered and a concept of design for durability is proposed. In the limit state approach to the structural design, durability should be treated and considered as a third limit state. Standards and recommendations related to the durability should be brought into universal application. Non-technical reasons that various structures show inadequate durability are shortly described. Design of structures should contain requirement of imposed durability. This approach is directed towards the life cycle design of structures as a necessary element of sustainable development.

POLSKA AKADEMIA NAUK  
KOMITET INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ

**PROBLEMY NAUKOWO-BADAWCZE  
BUDOWNICTWA**

Tom IV

**ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ  
W BUDOWNICTWIE**



# **Zrównoważony rozwój w budownictwie**

Sustainable development  
in building industry

Praca zbiorowa pod redakcją  
Andrzeja Łapko  
Mirośława Broniewicza  
Jolanty Anny Prusiel

Wydawnictwo Politechniki Białostockiej  
Białystok 2008