

Piotr NITA<sup>1</sup>, Małgorzata LINEK<sup>2</sup>, Adam POŚWIATA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)*

<sup>2</sup>*Kielce University of Technology (Politechnika Świętokrzyska)*

## ODPORNOŚĆ TERMICZNA BETONOWYCH NAWIERZCHNI LOTNISKOWYCH

### Thermal resistance of concrete airfield pavements

**Streszczenie:** *W eksploatacji betonowych nawierzchni lotniskowych często występuje zjawisko powstawania początkowo niewielkich powierzchniowo i stosunkowo płytkich odspojień przypowierzchniowej warstwy betonu. Może to być wynikiem naturalnych i wymuszonych oddziaływań temperatury na nawierzchnię. Rezultatem tych oddziaływań są naprężenia termiczne powstające w płycie betonowej oraz inne zjawiska zachodzące w strukturze betonu. Znaczące są tu zjawiska związane z przemieszczaniem się pary wodnej w przekroju płyty oraz powiązane z wymienionymi procesy skutkujące defektami struktury betonu. Defekty struktury płyty są efektem kompleksowego oddziaływania zjawisk: termicznych, wilgotnościowych i wytrzymałościowych, które uznano za stymulatory uszkodzeń.*

**Słowa kluczowe:** oddziaływania termiczne, naprężenia termiczne, stateczność termiczna, mikropęknięcia w betonie, pole temperatury, pole oddziaływania pary, element funkcjonalny lotniska (EFL)

**Abstract:** *Concrete airfield pavements can frequently suffer from initially small and relatively shallow delamination of the subsurface concrete layer. It may be due to natural and forced temperature impact on the pavement. As a result of these impacts, thermal stresses and other phenomena are formed in the concrete slab. The significant phenomena are those related to the movement of water vapour in the slab cross-section and the associated processes leading to defects of the concrete structure. They are due to the complex interaction of various phenomena: thermal, humidity and strength that were considered damage stimulants.*

**Keywords:** thermal impact, thermal stresses, thermal stability, microcracks in concrete, water vapour field, airfield functional element

## 1. Wprowadzenie

Zasadniczą, choć nie zawsze należycie dostrzeganą sprawą związaną z projektowaniem i użytkowaniem betonowych nawierzchni lotniskowych jest konieczność uwzględniania, oprócz naturalnego nagrzewania płyty w wyniku radiacji słonecznej, które jest zjawiskiem występującym cyklicznie, również cyklicznego, wysoko temperaturowego oddziaływania na te nawierzchnie strumieni gorących gazów spalinowych. Oddziaływania te spowodowane są emisją gazów spalinowych pochodzących z dysz wylotowych statków powietrznych. Zjawisko to, o charakterze dynamicznym, powoduje dla nawierzchni określone skutki, które w efekcie są w stanie obniżyć ich trwałość. Oddziaływanie to wyraża się poprzez:

- uszkodzenia temperaturowe, które powstają przy odpowiednio wysokich naprężeniach, pojawiających się wraz z szybkimi ich zmianami na powierzchni płyty. Gradienty temperatur w warstwie powierzchniowej płyty są wysokie, dochodzą nawet do 20–30°C na 1mm grubości płyty;
- wielokrotnie zmieniające się temperatury, powodujące uszkodzenia płyt, w następstwie czego w płycie obserwuje się: kumulację naprężeń zmęczeniowych i deformacji termicznych. Skutkiem tych oddziaływań są zmiany termicznej stateczności płyty. Według danych wybranych wyników analizy przedstawionej w pracy [6] można zauważyć, że okresowe, wielokrotne zmiany temperatur są w stanie spowodować uszkodzenie kruchych warstw powierzchni płyt. Stan techniczny betonowej nawierzchni lotniskowej poddanej częstym oddziaływaniom wymuszonych obciążeń wysoką temperaturą przedstawiono na rys. 1.

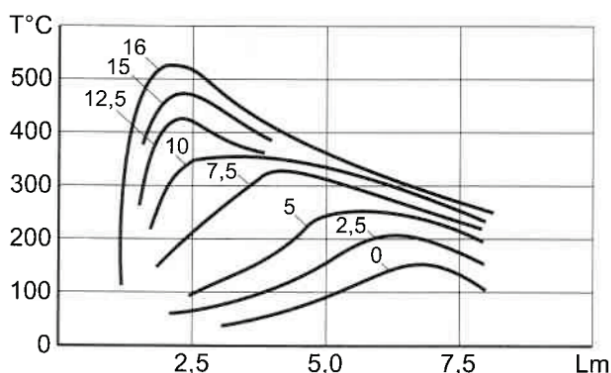


**Rys. 1.** Widok nawierzchni betonowej poddanej intensywnemu działaniu gorących strumieni gazów spalinowych emitowanych przez samoloty odrzutowe

Złożony stan naprężenia w płycie nawierzchniowej wykonanej z betonu cementowego, spowodowany emisją strumienia gorących gazów spalinowych z dyszy silnika statku powietrznego, powoduje zjawisko wyrażające się tym, że na powierzchni płyty formuje się naturalnie ukształtowany obszar rozkładu temperatury. Powstaje „pole strumienia” o zróżnicowanej temperaturze i intensywności oddziaływania. Charakterystycznym przykładem takiego pola jest rozkład temperatury na powierzchni płyty, który przedstawiono na rys. 2. Analiza tego stanu wymaga przyjęcia określonych kryteriów, zgodnie z którymi możliwa jest ocena termicznej odporności nawierzchni. Jak wynika z dotychczasowych badań i obserwacji dotyczących zniszczeń nawierzchni spowodowanych tymi oddziaływaniami [3, 6], typowymi dla tego rodzaju emisji jest: oddzielanie się powierzchniowej warstwy betonu od stabilnego rdzenia płyty betonowej, w następstwie tego oddziaływania bardzo często ma miejsce zjawisko rozległego powierzchniowego łuszczenia płyty. Na rys. 2 przedstawiono oddziaływanie strumienia gorących gazów spalinowych emitowanych przez samolot Su-22M na betonową płaszczyznę płyty podczas prób silników. Przyczynę zjawisk związanych z termicznym uszkodzeniem płyty betonowej można tłumaczyć: dużymi, różnokierunkowymi odkształceniami poprzecznymi, zmianą wymiarów liniowych płyty i pionowymi odkształceniami  $\xi z$ , które są konsekwencją naprężeń ściskających w płycie w relacji  $\sigma(x,y) = \sigma(z)$ .

W nielicznych pracach poświęconych tym zagadnieniom [4, 6] przedstawiono rezultaty obserwacji, na których podstawie możliwa jest ocena czasu zmian temperatury prowadzącej do uszkodzenia płyty, wykonanej z kruchego materiału, jakim jest beton. Temperatura na powierzchni płyty zależy również od kąta pochylenia podłużnej osi statku powietrznego w stosunku do niwelety nawierzchni. W postaci graficznej zależności te przedstawiono na rys. 3.





**Rys. 3.** Wykres rozkładu temperatury strumienia gazów spalinowych na powierzchni płyty betonowej w funkcji odległości od krawędzi dyszy, mierzony na przedłużeniu osi strumienia [6]

## **2. Analiza procesów zachodzących w płycie nawierzchniowej pod wpływem temperatury oraz wilgotności**

Proces destrukcji warstwy powierzchniowej płyty można rozpatrywać w aspekcie zagadnień teorii sprężystości dotyczących największych, względnych wydłużeń materiału. Kruche uszkodzenie nawierzchni w tym przypadku (odprysk, oderwanie) wiąże się ze zjawiskiem największego wydłużenia płyty. Zjawisko to można oszacować, wykorzystując wyniki doświadczeń właściwych dla tego rodzaju betonu pracującego na czyste, osiowe rozciąganie realizowane w odpowiedniej temperaturze. Stopień termicznego oddziaływania strumienia gazów zależy od prędkości i temperatury strumienia i innych szczegółów konstrukcyjnych silnika i dyszy wylotowej. Zaabsorbowane przez nawierzchnię betonową ciepło ogrzewa materiały składowe tworzące kompozyt betonowy (ciepło właściwe materiału), jak również wodę znajdującą się w wolnych objętościach betonu. W temperaturze wyższej niż 100°C znaczna jej część zamienia się w parę wodną, której kondensacja ma zasadniczy wpływ na przebieg procesu cieplnego w nawierzchni. Zjawisko filtracji pary wodnej w betonie zależy przede wszystkim od struktury betonu, rozkładu i wielkości porów, początkowej wilgotności betonu i następujących jej zmian w procesie nagrzewania powierzchni płyty. Nawet podczas krótkiego okresu nagrzewania płyt nawierzchniowych strumieniem gazów spalinowych, na głębokości 10–15 mm od powierzchni płyty, formują się izotermy wskazujące na temperaturę większą niż 100°C. Teoretyczne przedstawienie zjawisk zachodzących w strukturze betonu prezentowano w pracach [2, 4, 6] poprzez sformułowanie zależności w postaci następujących równań:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 \omega + k_{12} \nabla^2 t + k_{13} \nabla^2 p$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 \omega + k_{22} \nabla^2 t + k_{23} \nabla^2 p \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 \omega + k_{32} \nabla^2 t + k_{33} \nabla^2 p$$

gdzie:

$k_{ij}$  – współczynniki opisujące cieplne i fizyczne charakterystyki wymuszonego procesu termicznego. Wartości ich przyjmuje się w zależności od intensywności zjawisk związanych z termodynamicznymi procesami niestacjonarnymi zachodzącymi w ogrzewanej płycie nawierzchniowej.

Ten skomplikowany układ równań z uwagi na jego nieliniowość i ścisłą zależność współczynników  $k_{ij}$  od temperatury, wilgotności ośrodka i jego struktury, charakteryzuje się wysokim stopniem uogólnienia, wymaga dalszych analiz, które obecnie najwyraźniej wyprzedzają możliwości badawcze. Dalsze prace nad tym zagadnieniem powinny być wzbogacone wynikami badań doświadczalnych.

Obecnie proces destrukcji powierzchniowej warstwy betonu, rozpatruje się najczęściej w ujęciu teorii sprężystości – największych, względnych wydłużeń. Kruche uszkodzenie płyty betonowej (odprysk powierzchniowy) można porównać z wynikami doświadczeń, będących konsekwencją osiowego, czystego rozciągania próbki betonu w odpowiedniej temperaturze. Omawiane zjawisko można przedstawić w postaci zależności:

$$\epsilon_z = - \frac{2\mu(t)}{E(t)} \sigma(z) + \beta t(z) \quad (2)$$

Eliminując z powyższej zależności temperaturę odkształcenia, otrzymuje się sprężyste wydłużenie betonu z zależności:

$$\epsilon_{(z,y)} = - \frac{2\mu(t)}{E(t)} \sigma(z) \quad (3)$$

Jest oczywiste, że wielkość  $\epsilon_z$  z zależności (2) nie powinna przekraczać wielkości  $\epsilon_p$  z zależności (4):

$$\epsilon_p = \frac{R_r}{E(t)} \quad (4)$$

w której:

$R_r$  – wytrzymałość betonu na czyste rozciąganie w odpowiedniej temperaturze,

$\mu(t)$  – współczynnik Poissona,

$E(t)$  – moduł sprężystości betonu uwzględniający wpływ temperatury.

Ponadto:

$\xi(x,y)$  – sprężyste wydłużenie betonu,

$\xi_p$  – ustalone wydłużenie betonu w płycie właściwe dla odpowiedniej klasy betonu,

$\sigma(z)$  – wielkość naprężenia ściskającego w warstwie betonowej przy powierzchni płyty.

Wykorzystując zależności (3) i (4), otrzymuje się kryterium wytrzymałości betonu na ściskanie dla powierzchniowej jego warstwy. Wydzielanie się z powierzchni betonowej płyty cząsteczek tego materiału jest przede wszystkim konsekwencją naprężeń rozciągających. Niska przewodność termiczna betonu sprzyja termicznym uszkodzeniom płyty.

$$\sigma(z) \leq - \frac{R_r}{2\mu(t)} \quad (5)$$

Inną możliwą przyczyną uszkodzenia betonu nawierzchniowego podczas działania wysokiej temperatury są: występujące na niej zarysowania i pęknięcia płyty, które najczęściej wywołane są rozciągającymi naprężeniami temperaturowymi, opisanymi współrzędnymi  $x$  i  $y$ . Kryterium wytrzymałości dla tego przypadku uszkodzenia jest wyrażane zależnością (6).

$$\sigma(z) \leq R_s \quad (6)$$

Jeżeli założymy, że parametry:  $E$ ,  $\beta$  i  $\mu$  są niezależne od temperatury, to dla wyznaczenia wielkości naprężenia w płycie można wykorzystać zależność (7):

$$\sigma(z) = \frac{\beta E}{1-\mu} \left[ -t(z) + \frac{12}{h^2} \left( z - \frac{h}{z} \right) \int_0^h t(z) z dz + \left( \frac{4}{h} - \frac{6z}{h^2} \right) \int_0^h t(z) dz \right] \quad (7)$$

Konstruując termicznie odporną nawierzchnię, muszą być jednocześnie spełnione warunki 5 i 6. W rzeczywistości należy mieć na uwadze to, że wraz ze zwiększającą się grubością płyty oraz ustalonym gradientem temperatury, w sposób ciągły zmienia się wielkość naprężenia ściskającego. Wzrost gradientu temperatury powoduje zwiększenie się obu rodzajów naprężeń w płycie. Nawet w tej sytuacji istnieje możliwość zwiększenia termicznej niezawodności nawierzchni. Poprawę tej niezawodności uzyskać można poprzez wykonanie cienkich warstw termoizolacyjnych z materiałów o specjalnych własnościach lub modyfikacji składu betonu nawierzchniowego przez wprowadzenie do składu mieszanki betonowej żaroodpornych, ceramicznych składników [3]. Wykorzystując związki termosprężystości w zakresie przewodnictwa cieplnego dotyczące betonowej płyty nawierzchniowej, należy mieć na uwadze to, że nie zawsze znajdują one wyjaśnienie w ramach obliczeniowych modeli pracy nawierzchni. Ośrodek materialny, jakim jest beton, skutecznie przenosi naprężenia ściskające w odpowiedniej strefie płyty i znacznie gorzej naprężenia rozciągające, zachodzi przy tym relacja:

$$R \geq \tau \geq R_s$$

gdzie:  $\tau$  – jest przedziałem wytrzymałości na ściskanie.

W związku z powyższym, podczas nagrzewania powierzchni betonowej płyty lotniskowej najbardziej znaczące są naprężenia na swobodnej powierzchni płyty. Rozwój mikroszczelin w początkowym stadium będzie rezultatem naprężeń rozciągających lub wyznaczonej wielkości naprężeń ścinających. Prace związane z termicznym uszkodzeniem płyt nawierzchniowych były analizowane m.in. w [2].

Analizując stan poprzedzający oderwanie się niewielkiego fragmentu betonu z powierzchni płyty można uznać, że ta przypowierzchniowa warstwa betonu, osiągnęła graniczny stan stateczności sprężysto-plastycznej. Wpływ energii cieplnej na trwałość betonu cementowego, jak również na inne kruche materiały kompozytowe, sprowadza się do zmiany własności fizycznych i mechanicznych tych ciał. Charakterystycznymi zmianami są w tym przypadku zmiana wytrzymałości betonu w płycie i wystąpienie termicznych deformacji. W zależności od projektowanej struktury betonu, a głównie jego jednorodności, zmiany tych własności są różne. Obserwowany proces dehydratacji betonu podczas jego nagrzewu określa stopień przestrzennej stateczności siatki krystalograficznej, obniża jego wytrzymałość i zwiększa kruchość betonowej płyty i jednoznacznie wpływa na jej odporność termiczną. Obserwuje się, że pod działaniem temperatury zmienia się promień cząstek, uwidacznia się krzywizna ich powierzchni, a w strefie kontaktu pomiędzy składnikami zaczyn – kruszywo znacząco wzrastają naprężenia i następuje utrata spójności pomiędzy nimi. Sytuacja nagrzewania płyty nawierzchniowej przez strumień emitowanych, gorących gazów spalinowych może być analizowana również pod innym kątem. Należy wziąć pod uwagę zmieniającą się nasiąkliwość, wilgotność w strukturze betonu. Pole wilgotności zależy od zmiany swobodnej pary w temperaturze wyższej niż 120°C i przemieszczania się tych cząstek w strefę niższych temperatur, co powoduje skroplenie pary. Prowadzi to w efekcie do deformacji w wyniku naprężeń ściskających w strefie swobodnej akumulacji pary. Pole temperatury i pole akumulacji pary nakładają się na siebie, wynikiem tego jest złożony stan naprężenia w betonie o niestacjonarnym charakterze. Przemieszczenie pola naprężeń i skierowanie gradientu temperatur w przeciwnym kierunku wyraża się koncentracją w strefie parowania, a jej dynamika związana jest z intensywnością przewodzenia ciepła w kierunku powierzchni płyty betonowej. Brak teoretycznych, uznanych zależności opisujących zjawiska zachodzące w płycie nawierzchni betonowej można ocenić tylko w sposób przybliżony. Wiarygodna informacja dotycząca tych zjawisk może być uzyskana jako rezultat obserwacji parametrów odporności temperaturowej nawierzchni, które zrealizowano we wcześniejszym okresie. Najbardziej interesujące rezultaty doświadczeń wynikające z działania wysokich temperatur na nawierzchnię obserwuje się w przypadku gwałtownych uszkodzeń konstrukcji. Ten rodzaj uszkodzeń jest obecnie najbardziej zbadaną postacią, które mają miejsce po wystąpieniu intensywnego nagrzewania płyt nawierzchniowych. Charakterystycznym rodzajem uszkodzenia jest odrywanie się od powierzchni płyty nawierzchniowej niewielkich powierzchni betonu w postaci „soczewek” o powierzchni kilku centymetrów kwadratowych i maksymalnej grubości do 5 mm. W konstrukcjach o większej masie uszkodzenia są bardziej rozległe i kruche. Liczba czynników mających wpływ na ten rodzaj uszkodzeń jest znaczna i zależy od: historii obciążeń płyty: masowych



i temperaturowych, klasy betonu i jego składu, odporności mrozowej i stanu jego wilgotności (nasiąkliwości). Analizując modele uszkodzeń betonu poddanego działaniu wysokich temperatur, przedstawione w pracy [2] oraz własnych obserwacji przedstawionych w pracy [4] uważa się, że są one konsekwencją dynamicznego działania wysokich temperatur, których jądro strumienia koncentruje się na określonej, wybranej powierzchni obciążonej strumieniem gorących gazów o zmiennej temperaturze i intensywności (rys. 2). Jednocześnie należy zauważyć, że stan wilgotnościowy nawierzchni jest zmienny i zależy od: pory roku, dnia i nawet godzin. Zmienny stan wilgotnościowy powierzchni płyty nawierzchniowej powoduje brak stabilności wilgotnościowej w jej wnętrzu. Podczas intensywnego nagrzewania powierzchni płyty wilgoć zawarta w betonie znacząco wpływa na proces jego uszkodzeń, ponieważ wzbudzają się zjawiska powierzchniowo aktywne działania pary, związane ze zjawiskiem Rebintera. Podczas intensywnego nagrzewania woda zawarta w betonie znacząco wpływa na proces jego uszkodzenia. Nadmierny wpływ pary wodnej w strukturze betonu zaobserwować można również w bezpośrednim otoczeniu płyty. Można uznać, że płyta osiąga graniczny stan stateczności sprężysto-plastycznej.

### **3. Analiza powstających zarysowań temperaturowych w płycie**

Powstającą w strukturze betonu nieciągłość w postaci rysy określa się jako nieciągłość strukturalną materiału. Charakteryzuje się ona tym, że jej trzeci wymiar (szerokość) w betonie, który w danym momencie ma podwyższoną temperaturę, prowadzi w efekcie do powstania znacznej liczby pęknięć i możliwego odsłonięcia betonu w niżej położonych warstwach, w których wartość naprężenia będzie zmienna w porównaniu z wytrzymałością wyjściową.

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Największe naprężenie rozciągające spowodowane temperaturą dla swobodnej płyty, bez obciążenia zewnętrznego, występuje na jej krawędzi. W opinii przedstawionej w opracowaniu [5] stwierdzono, że naprężenie rozciągające występuje wówczas na ok. 0,2 do 0,3 grubości nagrzanej powierzchni płyty. Znajdująca się w porach betonu para intensyfikuje naprężenia rozciągające, których wielkość uzależniona jest od współrzędnych  $x, y, z$ . Ewentualna, miejscowa zmiana ciśnienia pary  $\Delta P$  może zapoczątkować powstanie mikroszczelin w betonie. Uwzględnienie dodatkowych naprężeń w betonie pochodzących od wzrostu ciśnienia pary będzie miało postać (9):

$$\sigma_1 + \Delta P \geq R_t \quad (9)$$

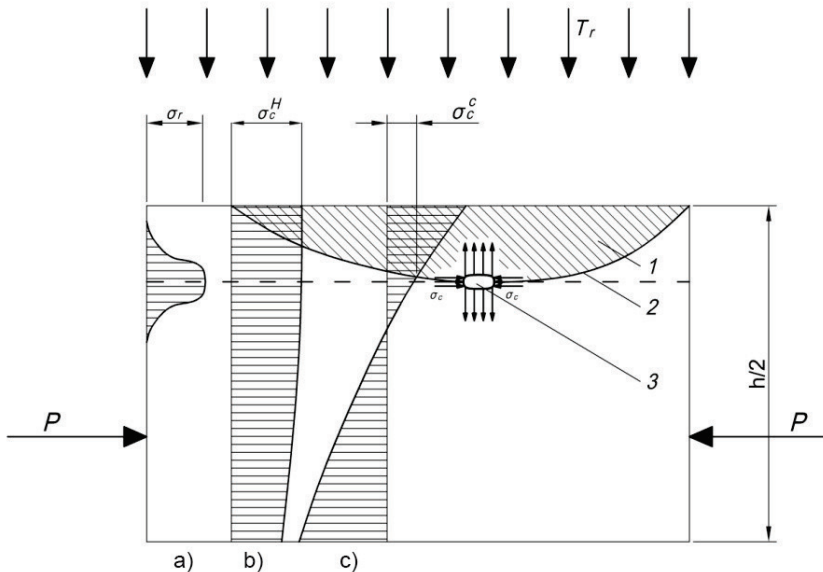
gdzie:

$\Delta P$  – oznacza zmianę ciśnienia pary w strukturze płyty betonowej w odpowiednim jej przekroju,

Rr – oznaczenie jak w zależności (4).

W procesie temperaturowego uszkodzenia płyt można doświadczyć ich detonacyjnego charakteru, który jest wynikiem działania złożonych naprężeń ściskających i rozciągających w strukturze betonu oraz filtracji pary w gorącej strefie płyty. Gwałtownym uszkodzeniom betonu towarzyszy często obecność w środowisku płyty znacznego jej zawilgocenia.

Złożone stany dotyczące wielkości naprężeń powodują określone skutki w postaci mikropęknięć i w ich następstwie rozwój szczelin. Przykładową sytuację związaną z powstaniem powierzchniowego odspojenia betonu nawierzchniowego przedstawiono na rys. 4.



**Rys. 4.** Rozkład naprężeń powstałych wokół mikroszczeliny w momencie gwałtownego uszkodzenia betonu spowodowanego losowym działaniem wysokich temperatur: a) odpowiednie naprężenia, b) naprężenie od wewnętrznego obciążenia, c) naprężenie od filtracji pary; 1) fragment odspojonego betonu, 2) trajektoria przebiegu mikroszczeliny, 3) mikroszczelina [6]

Złożony stan naprężenia w płycie sprzyja rozwojowi wielu mikroszczelin, a dalszy geometryczny ich rozwój aż do czasu osiągnięcia przez tę mikroszczelinę krytycznej długości  $lk$ . W tym stanie rozwoju mikroszczeliny jest ona niestabilna. W strefie nagrzewania przemieszcza się z bardzo wysoką prędkością, która bliska jest prędkości akustycznej, powierzchniowej fali Rayleigha i przebiega wzdłuż nagrzewanej powierzchni płyty. Należy

zauważyć, że im większe są naprężenia w nagrzewanych płytach, tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia bardzo dynamicznego zniszczenia płyty, łącznie z efektem akustycznym.

Rzeczywiste naprężenia ściskające w płycie betonowej spowodowane działaniem temperatury zależą od właściwości betonu, wysokości temperatury, czasu jej emisji, a także warunków granicznych przyjętych w założeniach obliczeniowych. Jednak pomimo uściślenia przyjętych założeń i schematów obliczeniowych, wyjaśnienie dynamicznego uszkodzenia betonu nie uwzględnia szeregu zjawisk, które mają wpływ na zaistniałe rozbieżności w ocenie przyczyn dynamicznego uszkodzenia betonu. Dotychczasowe próby wyjaśnienia tego zjawiska, polegają na wykorzystaniu kinetycznej teorii uszkodzenia ciał twardych. Większość teorii dynamicznych uszkodzeń posługuje się pojęciem „defektów struktury”. Defekty te są wynikiem złożonych oddziaływań termicznych, wilgotnościowych i wytrzymałościowych stymulatorów procesu uszkodzeń. Mając jednak na uwadze potrzebę technicznej oceny stanu betonowej nawierzchni lotniskowej, wprowadzono pojęcie stopnia uszkodzenia materiału  $K\tau$ , który wyraża wielkość poziomu koncentracji uszkodzeń w analizowanym obszarze w momencie  $\tau$  oddziaływania stymulatorów uszkodzeń. Wielkość tę można uznać za graniczną miarę strat materiału przede wszystkim jego struktur mechanicznych.

## **4. Podsumowanie**

Naprężenia temperaturowe w betonowych nawierzchniach lotniskowych oraz możliwość uwzględnienia ich skutków dla trwałości nawierzchni są ciągle problemem wymagającym dalszych obserwacji i analiz. Złożone warunki oddziaływania zewnętrznych czynników pogodowych i eksploatacyjnych powodują takie stany wyężenia w płytach, które trudno przedstawić w postaci integralnego modelu obliczeniowego. W przypadku złożonych i niejednorodnych warunków zewnętrznych obserwuje się niejednolite pole temperatury, odpowiednie pole naprężeń temperaturowych. Niejednorodności występują najczęściej na granicy pomiędzy suchą i wilgotną strefą płyty. Gdy naprężenie rozciągające przewyższa wytrzymałość betonu, na powierzchni płyty w początkowym okresie uwidacznia się siatka mikroszczelin, która dalej wykazuje tendencje rozwojowe. Dlatego opis zjawisk i powstały w ich wyniku model obliczeniowy takiej płyty oraz jego analiza będzie tylko przybliżeniem rzeczywistości. Wnikliwe obserwowanie zachowań płyt w określonych warunkach i racjonalne procedury eksploatacyjne będą na obecnym etapie podstawą do prowadzenia zabiegów utrzymaniowych na elementach funkcjonalnych lotniska, które ze swojej istoty są najbardziej narażonymi elementami lotniska. W analizie stanu termicznego wyężenia płyty nawierzchniowej najczęściej uwzględnia się: stopień deformacji płyt związanych z granicznymi warunkami, zależność naprężeń od grubości płyty, wielkości gradientu temperatur, wielkości pola oddziaływania strumienia wraz z wyróżnieniem stref, na których nakładają się temperaturowe oddziaływania naturalne z ewentualnie oddziaływaniami wymuszonymi. Związana z tym jest również transformacja wyznaczenia naprężeń z modelu

przestrzennego (trójwymiarowego) oddziaływania temperaturowych obciążeń płyty na model jednowymiarowy. Jednocześnie należy zauważyć, że destrukcyjne oddziaływanie wysokich temperatur na beton jest mniejsze dla betonów o niższych klasach i o mniej zwartej strukturze.

## **5. Literatura**

1. Brandt A.M., Kasperkiewicz J.: Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2003.
2. Czerepanow G.P.: Mechanika chrupkowo rozruszenija. Moskwa 1974.
3. Linek M.: Beton o podwyższonych parametrach fizycznych i mechanicznych na działanie wymuszonych obciążeń temperatury. Praca doktorska. Wydział Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, 2013.
4. Nita P., Linek M., Wesołowski M.: Betonowe i specjalne nawierzchnie lotniskowe. Teoria i Wymiarowanie Konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2022.
5. Rickenstorf G.: Beton abplatzungen an temperatur beanspruchten Bauteilen, Bauplanung - Bautechnik 1970. Bd 24. No 5.
6. Trygoni B.E.: Struinnaja erozja aerodromow. Wydawnictwo Transport, Moskwa 1981.
7. Żukow B.B.: Pricziyny wzriwoopasnogo betona pri pożare - Beton i zelezobeton. 1976. No. 3.