

## WPLYW PIERWOTNYCH USZKODZEŃ BUDYNKÓW MUROWYCH NA ICH ODPOWIEDŹ DYNAMICZNĄ

ANDRZEJ WAWRZYNEK, MAGDALENA MROZEK, DAWID MROZEK

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska  
e-mail: andrzej.wawrzynek@polsl.pl, magdalena.mrozek@polsl.pl, dawid.mrozek@polsl.pl*

Streszczenie. Artykuł zawiera porównanie wyników analiz dynamicznych wybranych zastępczych ścian modeli budynków murowych wstępnie uszkodzonych z modelami ścian bez uszkodzeń. Analizowane modele uwzględniają zniszczenia wynikające z podziemnej eksploatacji górniczej, ograniczonej do części murowej trzech typów budynków. Porównania modeli dokonano na podstawie analizy zmiany wartości globalnego kąta odkształcenia postaciowego ściany murowej podczas trwania wymuszenia dynamicznego.

### 1. WSTĘP

Analizy dynamiczne budynków o konstrukcji murowej najczęściej prowadzone są przy użyciu wyidealizowanych modeli numerycznych. Idealizacja ta najczęściej dotyczy uproszczonego: opisu materiału konstrukcji (model liniowo sprężysty) oraz geometrii obiektu (uproszczenia bryły, połączenia pomiędzy elementami konstrukcji, pominięcie elementów drugorzędnych). Zakładana jest także „idealna” technologia wykonania obiektu, która prowadzi do idealizacji stanu początkowego modelu numerycznego budynku [7]. Z poznawczego (naukowego) i praktycznego punktu widzenia ciekawsza wydaje się pogłębiona analiza budynków w zakresie znacznych obciążeń wywołujących pozasprężystą pracę materiału (z uwzględnieniem degradacji, muru i/lub betonu). Dodatkowym, interesującym problemem jest określenie wpływu istnienia początkowych uszkodzeń w obiekcie (o różnej geometrii) na jego odpowiedź statyczną (analiza naprężeń) i dynamiczną (analiza względnych przemieszczeń ściany murowej).

Na obszarach o wzmożonej aktywności eksploatacji podziemnej lub w sąsiedztwie wzmożonego ciężkiego ruchu drogowego (lub kolejowego) obiekty budowlane narażone są na silne wpływy dynamiczne (parasejsmiczne) i statyczne. Deformacja terenu spowodowana przejściem niecki wydobywczej lub osiadaniem gruntu, a także niska jakość robót budowlanych i materiałów, może być przyczyną charakterystycznych uszkodzeń budynków. Uzasadnione jest zatem podjęcie realistycznej analizy obiektów narażonych na oddziaływania dynamiczne z uwzględnieniem różnych typów uszkodzeń.

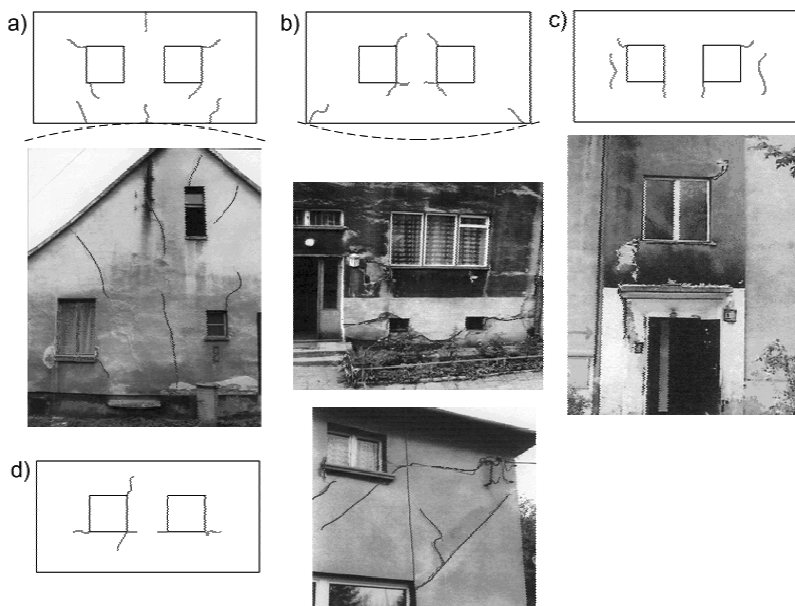
Założono, że w obliczeniach wykorzystywany będzie nieliniowy, sprężysto-plastyczno-degradacyjny model materiału (muru i betonu). Oznacza to, że materiał po osiągnięciu pewnego poziomu wyężenia uplastycznia się i ulega częściowej degradacji, przy czym mechanizmy wzmocnienia/osłabienia oraz degradacji podczas rozciągania i ściskania muru są opisane różnymi zależnościami, określanymi w odpowiednich badaniach laboratoryjnych.

Zastosowany model materiałowy – *Barcelona Model (BM)* – uwzględnia również częściowe odtworzenie własności materiału zdegradowanego w wyniku rozciągania. Fizycznie stan ten można określić jako „zamknięcie” rys w wyniku działania naprężeń ściskających. Do opisu poziomu degradacji służą trzy parametry o wartościach z przedziału domkniętego  $<0; 1>$ :  $d_i$ ,  $d_c$ ,  $SDEG$ , oznaczające współczynniki degradacji spowodowanej odpowiednio rozciąganiem, ściskaniem i współczynnik sumaryczny (uwzględniający zamknięcie rys). Zerowa wartość współczynników oznacza brak degradacji, natomiast wartość równa jeden – całkowite zniszczenie materiału.

W niniejszej pracy zestawiono wyniki odpowiedzi dynamicznych trzech typów budynków o konstrukcji murowej przy zbliżonym do rezonansowego wymuszeniu harmonicznym. Analizowano zarówno budynki wstępnie uszkodzone, jak i nieuszkodzone. W pracy założono, że pierwotne spękania w części murowej są efektem statycznej deformacji terenu wywołanej eksploatacją górnictw.

## 2. WSTĘPNE USZKODZENIA BUDYNKÓW

Podziemna eksploatacja złóż kopalin może być przyczyną zmian obserwowanych na powierzchni terenu. Zasadniczy wpływ eksploatacji górnictw objawia się poprzez przemieszczanie elementów górotworu oraz jego wstrząsy. Przemieszczenia te mogą powodować miejscową deformację powierzchni terenu oraz zmianę relacji wodnych. Są one główną przyczyną występowania licznych uszkodzeń budynków murowych, a ich stopień jest uwarunkowany typem deformacji oraz charakterystyką konstrukcyjną obiektu budowlanego.



Rys.1. Schematy i rzeczywiste zarysowania konstrukcji murowej wywołane eksploatacją górnictw [9] – oddziaływanie: a) niecki wypukłej (*NW*), b) niecki wklęsłej (*NWK*), c) przestrzennej niecki obniżen (*PNO*), d) lokalnych deformacji nieciągłych (*LDN*).

Ciągłe deformacje terenu pod obiektem, wywołane przejściem niecki górnictw, mogą być źródłem spękań i zarysowań, których układ i lokalizacja zależą od położenia budynku

względem niecki. Uszkodzeniu ulegają zarówno ściany nośne (zewnątrzne i wewnętrzne), stropy (oraz ich połączenia) oraz elementy drugorzędne (np. ścianki działowe). Pomiar i obserwacje uszkodzeń pozwalają wyodrębnić pewne typy uszkodzeń charakteryzujące różne fazy przejścia niecki górniczej [3].

Zawężając analizę do budynków murowych, o ścianowej konstrukcji nośnej, wpływ ciągłych deformacji terenu objawia się spękaniem i szczelinami w ścianach, głównie o ukośnym przebiegu, zarysowaniem krawędzi połączeń ścian czy separacji połączenia ściana-strop. Przedmiotem dalszych rozważań będzie analiza czterech typów uszkodzeń zewnętrznych ścian nośnych (trzech budynków) będących efektem oddziaływania ciągłych i nieciągłych deformacji obrzeża niecki górniczej.

Schematyczne układy zarysowań ścian zewnętrznych oraz ich rzeczywiste obrazy przedstawione są na rys.1. Oddziaływanie niecki wypukłej (*NW*) w postaci poważnych spęknięć zewnętrznej ściany szczytowej rzeczywistego obiektu przedstawia rys.1a. Układ ten charakteryzuje się koncentracją spęknięć w dolnych kondygnacjach budynku oraz ich ukośnym rozchodzeniu się na zewnątrz w kondygnacjach wyższych. Odwrotny układ można zaobserwować na rys.1b, gdzie przedstawiono przykład wpływu niecki wklęsłej (*NWK*) na budynek. W efekcie obserwujemy liczne zarysowania konstrukcji murowej zlokalizowane w okolicach perforacji ściany o przebiegu ukośnym i poziomym. Oddziaływanie przestrzennego obrzeża górniczej niecki obniżeń skutkuje pęknięciami muru zilustrowanymi na rys.1c, gdzie dominują uszkodzenia o pionowym przebiegu. Jednymi z najgroźniejszych pod względem stateczności konstrukcji są uszkodzenia budynku wynikające z nieciągłej deformacji terenu o lokalnym zasięgu (*LDN*).

### 3. MODELE ANALIZOWANYCH BUDYNKÓW I ICH USZKODZEŃ

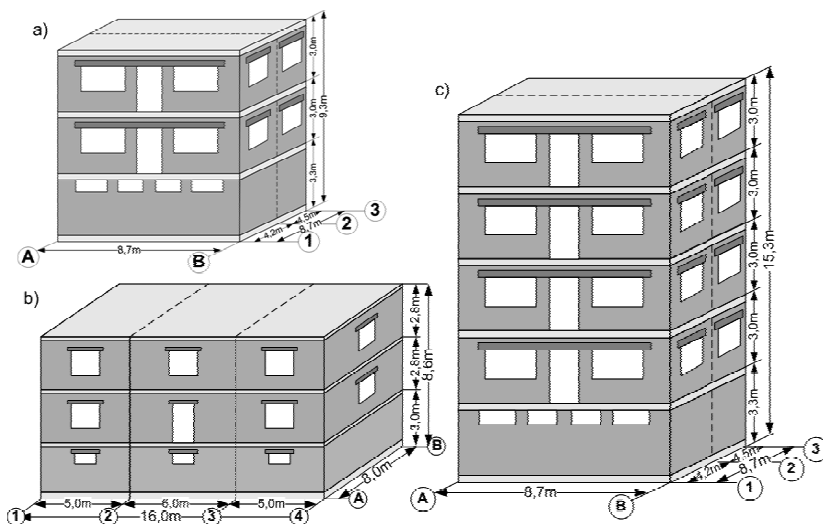
Analizę dynamiczną (czasową - *THA*) wybranych obiektów przeprowadzono z wykorzystaniem profesjonalnego pakietu MES o nazwie ABAQUS. Każda z nich poprzedzona została analizą statyczną z zadaniem ciężarem własnym i częścią obciążenia użytkowego. Do analizy odpowiedzi dynamicznej uszkodzonych budynków stworzono trzy symetryczne, przestrzenne modele obiektów o różnej liczbie kondygnacji i różnych wymiarach:

- budynek niski – *N* (rys.2a) o wymiarach gabarytowych – 8,7x8,7x9,3 m,
- budynek szeroki – *S* (rys.2b) – 16,0x8,0x8,6 m,
- budynek wysoki – *W* (rys.2c) – 8,7x8,7x15,3 m.

Ze względu na długi czas obliczeń modele przestrzenne wykorzystano jedynie do stworzenia odpowiedniego modelu płaskiego wybranej ściany współpracującej ze ścianami poprzecznymi i stropami. Algorytm tworzenia modeli *2D* został opisany m.in. w [4], [5]. Jego główna idea sprowadza się do ustalenia takich parametrów geometrycznych i warunków brzegowych, aby odpowiedzi modeli *3D* i *2D* (wybrana ściana) były zbliżone zarówno w zakresie analizy statycznej, jak i dynamicznej. Dodatkowo w modelach zastosowano liniowo-sprężyste charakterystyki materiału stropów oraz ścian współpracujących z analizowaną ścianą. Oczywiście, wspomniane uproszczenie modelu *3D* do *2D* jest możliwe jedynie w przypadku wymuszenia równoległego do powierzchni tarczy (ściany). Obciążenie dynamiczne zdefiniowano jako wymuszenia harmoniczne o charakterystyce zbliżonej do rezonansowej każdego z analizowanych modeli. Postąpiono tak, aby uniezależnić się od dodatkowego wpływu niestacjonarnego sygnału na model budynku.

Wykonano płaskie zastępcze modele budynków z uszkodzeniami (*MBU*) wynikającymi z eksploatacji górniczej, schematycznie przedstawionymi na rys.1. W przypadku modelu budynku *N* analizowana ściana została podzielona na ponad 25 tys. kwadratowych

elementów tarczowych, co prowadzi do ponad 53 tys. stopni swobody. Analogicznie płaskie modele budynków  $W$  i  $S$  podzielono odpowiednio na 40 014 i 50 132 elementów skończonych, co daje ponad 84 tys. i ponad 100 tysięcy stopni swobody. Stworzono również odpowiadające tym modelom zadania, które nie uwzględniały uszkodzeń konstrukcji ( $MBN$ ).



Rys.2. Geometria analizowanych budynków:  
a) niskiego ( $N$ ), b) szerokiego ( $S$ ), c) wysokiego ( $W$ ).

Wstępne uszkodzenia ścian zrealizowano poprzez usunięcie odpowiednich elementów skończonych i wprowadzenie kontaktu o więzach jednostronnych z jednoczesnym uwzględnieniem tarcia. Analizowane przypadki zawierają uszkodzenia o długości nieprzekraczającej 60 cm, a wstępna rozwarłość rysy ustalona została na poziomie 0,2 mm. Wprowadzone w modelach uszkodzenia wstępne mogą mieć, oczywiście, różny przebieg, długość i położenie. Dobierając siatkę spękań, kierowano się założeniami mającymi na celu:

- przeciwdziałanie wstępnemu geometrycznemu podziałowi modelu na części,
- skrócenie czasu trwania obliczeń ze względu na modelowanie kontaktu w rysach geometrycznych,
- zlokalizowanie uszkodzeń, które pod wpływem obciążenia dynamicznego mogą ulec powiększeniu.

#### 4. WPŁYW USZKODZEŃ MURU NA ODPOWIEĆ DYNAMICZNĄ BUDYNKU

Analizę wpływu pierwotnych uszkodzeń budynków w części murowej przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszej kolejności ustalono charakterystykę dynamiczną każdego z modeli, następnie określono kryterium oceny wpływu uszkodzeń przy obciążeniu dynamicznym.

##### 4.1. Analiza wartości częstości drgań własnych modeli

Efektom analizy modalnej były wartości i postacie częstości drgań własnych wszystkich zdefiniowanych zastępczych modeli tarczowych. Jednocześnie dokonano oceny uzyskanych

pierwszych wartości własnych  $MBU$  (oznaczenie:  $\omega_1(MBU)$ ) odnosząc je do rozwiązań  $MBN$  (oznaczenie:  $\omega_1(MBN)$ ) zgodnie z zależnością (1). W efekcie otrzymano względną procentową zmianę pierwszej wartości drgań własnych modelu  $\Delta\omega_1^{UN}$  w zależności od zastosowanego układu uszkodzeń w ścianie murowej.

$$\Delta\omega_1^{UN} = \frac{\omega_1(MBU) - \omega_1(MBN)}{\omega_1(MBU)} 100\% \quad (1)$$

Każdorazowe uwzględnienie pierwotnych zarysowań skutkowało spadkiem wartości względnej procentowej zmiany pierwszej częstości drgań własnych modelu z uszkodzeniami. Największy, nawet do  $\Delta\omega_1^{UN} = -9,6\%$ , był udziałem modelu budynku  $N$  z uszkodzeniami typu  $PNO$ . Znaczące wartości wspomnianego obniżenia częstości uzyskano także przy rozwiązaniu modelu z uwzględnieniem uszkodzeń typu  $NW$  ( $-9,4 \div -1,0\%$ ). Najmniejszy wpływ (do pominięcia) zaobserwowano w przypadku modeli z uszkodzeniami o układach  $NWK$  (od  $-0,6\%$ ) i  $LDN$  (od  $-0,5\%$ ). Szczegółowe rozwiązania analizowanych przypadków przedstawiono w [9].

#### 4.2. Kryterium ilościowej oceny wpływu uszkodzeń muru

Przekroczenie warunku stanu granicznego nośności wiąże się z osiągnięciem przez główne naprężenia rozciągające  $\sigma_1$  wartości większej od wytrzymałości muru na rozciąganie  $f_{va}$ . Skutkiem tego jest kształtowanie się zarysowania muru w kierunku prostopadłym do osi głównych naprężeń rozciągających  $\sigma_1$ . Uszkodzenie takie nastąpi przy pewnej wartości kąta odkształcenia postaciowego ściany, co świadczy o przekroczeniu stanu granicznego użyteczności opisanego poniższym warunkiem [2]:

$$\Theta_{Sd} \leq \Theta_{adm} \quad (2)$$

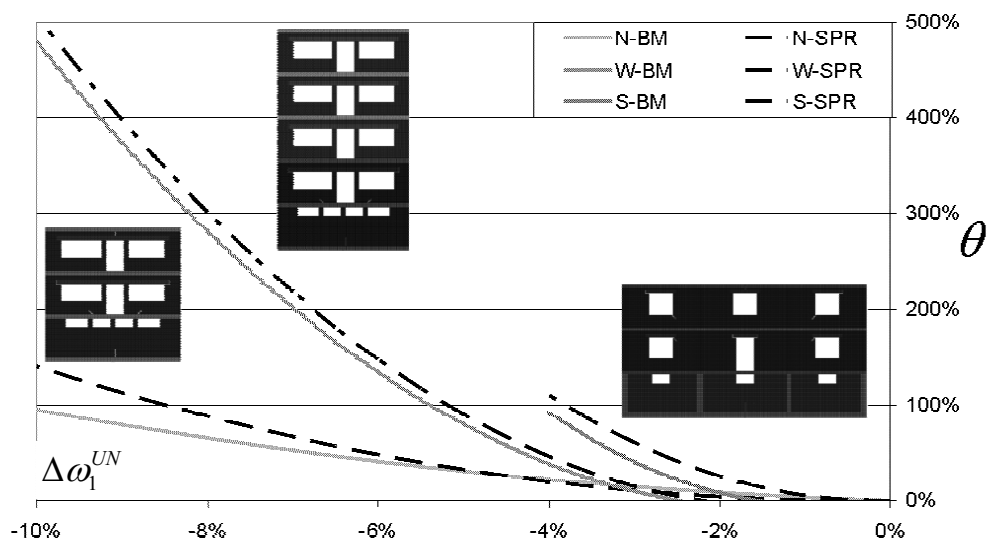
gdzie przez  $\Theta_{Sd} = \Theta_{Sd}(t)$  oznaczono zmienną w czasie wartość kąta odkształcenia postaciowego wyznaczoną w obliczeniach numerycznych, a przez  $\Theta_{adm}$  – dopuszczalną wartość kąta odkształcenia postaciowego opisana w [2]. Proponuje się przyjąć, jako miarę wyężenia ściany, wartość globalnego kąta odkształcenia postaciowego ( $GKOP$ ) i może stanowić podstawę kryterium porównawczego możliwości rysowania się ścian budynków, przy uwzględnieniu pierwotnych nieciągłości w strukturze muru konstrukcyjnego [1]. Jako kryterium oceny wrażliwości budynku uszkodzonego obciążonego dynamicznie w porównaniu do budynku idealizowanego zaproponowano niższą zależność definiującą względny sumaryczny kąt odkształcenia postaciowego  $\theta$  ( $WSKOP$ ) wybranej kondygnacji analizowanego obiektu.

$$\theta = \frac{A^{MBU}(\Theta_{Sd} > \Theta_{adm}) - A^{MBN}(\Theta_{Sd} > \Theta_{adm})}{A^{MBN}(\Theta_{Sd} > \Theta_{adm})} 100\% \quad (3)$$

gdzie: przez  $A^{MBU}$  (oraz odpowiednio  $A^{MBN}$ ) oznaczono pole tej części powierzchni pod wykresem zmian w czasie wartości  $GKOP$  kondygnacji  $MBU$ , gdy nie jest spełniony warunek (2). Oznacza to, że obliczona w analizie dynamicznej chwilowa wartość  $GKOP$  przekracza wartość dopuszczalną. Szczegółowe analizy wartości  $WSKOP$  zamieszczono w [6] i [8], gdzie stosowano obciążenie dynamiczne w postaci sygnału parasejsmicznego.

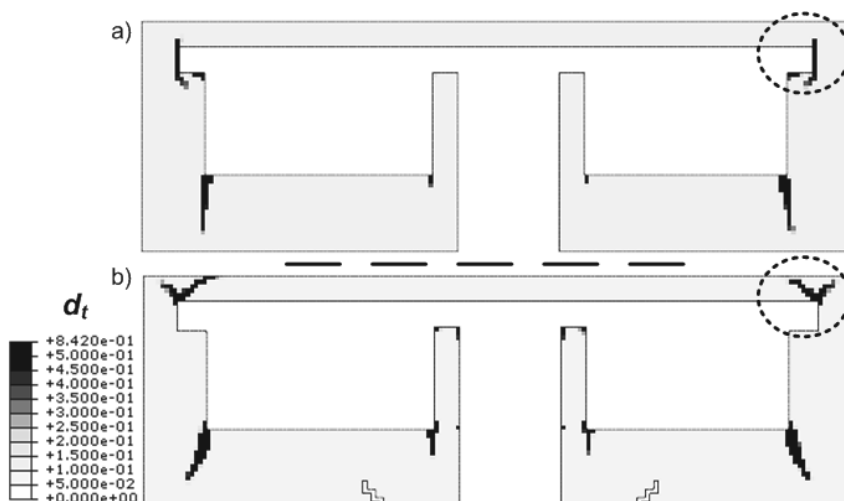
Wartość dopuszczalna kąta odkształcenia postaciowego uzależniona jest od stosowanego materiału i w przypadku muru wykonanego z elementów grupy 1 na zaprawie cementowo-wapiennej wynosi  $\Theta_{adm} = 0,5$  mm/m [2]. Przyjmuje się, że dopuszczalna wartość kąta

odkształcenia postaciowego w obiektach murowych zlokalizowanych na terenach eksploatacji górniczych zawarta jest w przedziale  $0,25 \div 0,4$  mm/m [9]. Przekroczenie dopuszczalnej, w przypadku danego muru wartości kąta odkształcenia postaciowego  $\theta_{adm}$  pociąga za sobą degradację materiału. W prezentowanych poniżej wynikach analiz przyjęto minimalną wartość  $\theta_{adm}$  równą  $0,25$  mm/m. Jak już wspomniano, w obliczeniach numerycznych wykorzystano *MB*. Jedną z miar degradacji analizowanego materiału jest współczynnik degradacji  $d_t$ . Obliczenia wykazały, że jeżeli  $\theta_{adm}$  przekracza wartość minimalną, to wówczas współczynnik  $d_t$  przekracza wartość  $0,3$ . Oznacza to, że przyjęte kryterium wykorzystujące *GKOP* może zostać powiązane z postępującą degradacją materiału obserwowaną w modelu materiału *BM*. Istotniejszą kwestią jest to, że owo kryterium jest spełnione również w przypadku modeli uwzględniających wstępne uszkodzenia muru. Dlatego też każda dodatnia wartość  $\theta$ , obliczona wg (3), oznacza propagację zadanego uszkodzenia w *MBU* pod wpływem obciążenia dynamicznego.



Rys.3. Zestawienie wyników wpływu pierwotnych uszkodzeń konstrukcji murowej ( $\Delta\omega_1^{UN}$ ) na odpowiedź dynamiczną ( $\theta$  względem *GKOP*) trzech typów budynków.

Na rys.3 pokazano jak zmienia się względny sumaryczny kąt odkształcenia postaciowego  $\theta$  w zależności od spadku wartości  $\Delta\omega_1^{UN}$ , w przypadku trzech różnych modeli obiektów murowych. Na wykresie ciągła linia oznacza rozwiązanie z wykorzystaniem nieliniowego modelu materiału, przerywana – liniowo-sprężystego. Poniżej pokazano przykładowe mapy rozkładu niemającego parametru zniszczenia muru przy rozciąganiu (rys.4), zarejestrowane w ostatnim kroku obliczeniowym. W przypadku analizy zastępczego modelu ściany budynku *N* obszary, w których degradacja spowodowana rozciąganiem osiąga wartości  $d_t$  większe od  $0,5$ , zlokalizowane są w okolicy pierwotnie zdefiniowanego uszkodzenia typu *NW* (rys.4b). Świadczyć to może o możliwej propagacji istniejącej rysy w wyniku obciążenia dynamicznego. Obszar elementów skończonych, przy których  $d_t > 0,5$  (w przypadku modelu budynku nieuszkodzonego) jest mniejszy, co zilustrowano na rys.4a.



Rys.4. Rozkład parametru degradacji przy rozciąganiu  $d_t$  w murze budynku  $N$  w ostatnim kroku obliczeń dynamicznych: a)  $MBN$ , b)  $MBU$

Analiza wyników zamieszczonych na rys.3 sugeruje, że prowadzenie analiz numerycznych na modelach idealizowanych o znacznych gabarytach może skutkować przeszacowaniem ich odporności przy oddziaływaniu dynamicznym. Pod tym względem najbardziej niebezpieczne są uszkodzenia zlokalizowane w narożach perforacji ściany. Prowadzą one do największego spadku wartości częstości drgań własnych budynku, a wpływem obciążenia dynamicznego może dojść do propagacji wstępnych spękań na znacznym obszarze.

## 5. PODSUMOWANIE

Rozważając, zaprezentowane na rys.3, wyniki analiz dynamicznych, można przypuszczać, że idealizacja modelu budynku (nieuwzględnienie uszkodzeń konstrukcyjnych) może prowadzić do lokalnego lub globalnego przekroczenia stanów nośności konstrukcji podczas obciążenia dynamicznego. Oczywiście, poza zakresem i układem zarysowań ściany istotny jest charakter samego wymuszenia. Dlatego niebagatelną rolę w analizie dynamicznej konstrukcji powinno stanowić pogłębione badanie samego sygnału. Dodatkowo autorzy są świadomi, że konieczne jest urzeczywistnienie kryterium ilościowego opartego na  $GKOP$  poprzez przeprowadzenie badań laboratoryjnych. Takie kierunki dalszych badań wydają się zasadne, a nawet wskazane.

Poprzez zastosowanie zaawansowanego modelowania numerycznego opartego na złożonym modelu materiałowym oraz analizie czasowej istnieje możliwość badania wpływu pierwotnych uszkodzeń konstrukcji murowej podczas obciążenia dynamicznego. Jak wykazano w pracy, wpływ ten jest głównie negatywny pod względem wyęźnienia konstrukcji, a tym samym nie może zostać zbagatelizowany.

## LITERATURA

1. Kubica J., Lipski Z., Wawrzynek A.: Analiza stanu wyężenia wywołanego wstrząsami górnictwymi w budynkach jednorodzinnych w świetle PN-99/B-03002. In: Proc. of the XLVI Conference of KILiW, Polish Academy of Sciences (PAN) 2000, p. 99-106.
2. Kubica J.: Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi pionowymi przemieszczeniami podłoża. Monografia habilitacyjna. Zesz. Nauk. Pol. Śl. s. „Budownictwo” z.96. Gliwice 2003.
3. Kawulok M.: O kwalifikowaniu przyczyn uszkodzeń w obiektach budowlanych na terenach górniczych. W: VIII konferencja naukowo-techniczna „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego”. Warszawa: ITB, 2004, s. 129-142.
4. Mrozek M., Mrozek D.: Analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modeli budynków 3D i 2D z uwzględnieniem podatności podłoża. Część 1: opis procedury. W: IX Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa. Zesz. Nauk. Pol. Śl. , s. „Budownictwo” 2008, z.113, s. 193-202.
5. Mrozek M., Mrozek D.: Analiza porównawcza dynamicznej odpowiedzi modeli budynków 3D i 2D z uwzględnieniem podatności podłoża. Część 2: wyniki obliczeń. W: IX Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa. Zesz. Nauk. Pol. Śl. , s. „Budownictwo” 2008, z.113, s. 203-210.
6. Mrozek M., Mrozek D.: Analiza dynamiczna murowych budynków uszkodzonych. W: X Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa. Gliwice: Pol. Śl., 2009. Monografia nr 232.
7. J. Králik, J. Králik Jr.: Seismic analysis of reinforced concrete frame-wall systems considering ductility effects in accordance to Eurocode. “Engineering Structures” 2009, 31, p. 2865-2872.
8. Wawrzynek A., Mrozek M., Mrozek D.: Numeryczna analiza dynamiczna wstępnie uszkodzonych konstrukcji murowych. ”Inżynieria i Budownictwo”2010, nr 5-6, s. 332-335.
9. Mrozek D.: Nieliniowa analiza numeryczna dynamicznej odpowiedzi uszkodzonych budynków. Rozprawa doktorska, Gliwice: Pol. Śl., 2010. .

## INFLUENCE OF INITIAL DAMAGES OF MASONRY BUILDINGS ON THEIR DYNAMIC ANSWER

Summary. The paper includes comparison of dynamic analyses results selected equivalent walls initial damaged masonry buildings models with undamaged ones. Analyzed models take into consideration damages caused by mine exploitation which are enclosed into masonry part of three buildings types. Comparison of models was creating per analyses value of the global angle of non-dilatation strain calculated from masonry wall during the dynamic load lasting.

*Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie przyznanych grantów obliczeniowych nr MNiSW/Sun6800/ PŚląska/083/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/083/2007, a także MNiSW/Sun6800 /PŚląska/084/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/084/2007.*