

mgr inż. Piotr Pawłowski
prof. dr hab. inż. Jan Holnicki-Szulc
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

STRUKTURY MECHANICZNE TYPU HARMONIKOWEGO (MULTIFOLDING) W ADAPTACYJNYCH UKŁADACH DYSSYPACJI ENERGII

1. Wprowadzenie.

Dyssypacja energii w układach mechanicznych jest niezwykle ważnym problemem inżynierskim i naukowym. Dyssypacja ta możliwa jest dzięki występowaniu zjawisk takich jak plastyczne płynięcie metali, powstawanie kruchych pęknięć, delaminacja czy tarcie. W ostatnich latach można zaobserwować coraz większe zainteresowanie użyciem wielu “inteligentnych” (funkcjonalnych) materiałów, które dzięki sprzężeniu efektów mechanicznych z różnymi zjawiskami fizycznymi (pola magnetyczne, elektryczne, zmiany temperatury) pozwalają na adaptację konstrukcji poddanych działaniu silnych obciążeń dynamicznych [1, 2].

Głównym celem układów adaptacyjnej absorpcji energii jest optymalne dostosowanie właściwości struktury dyssypującej energię do siły uderzenia. Struktura ta może być wykonana w całości z materiałów inteligentnych lub jedynie częściowo wyposażona w sterowalne urządzenia nazywane “bezpiecznikami” wymuszające pożądane zachowanie jej elementów.

Energia dyssypowana E^{dys} wewnątrz absorbera niezależnie od rodzaju zachodzących w nim procesów, równa jest pracy obciążenia zewnętrznego W :

$$W = \int_0^{q \max} F(q) dq = \int_{\Omega} E^{dys} d\Omega$$

gdzie: Ω , - obszar absorpcji energii F – zewnętrzna siła zgniatania, q – deformacja absorbera.

Optymalną odpowiedzią dyssypatora na obciążenie dynamiczne jest stała, uśredniona w funkcji przemieszczenia siła, która jednak w warunkach rzeczywistych

nie jest możliwa do osiągnięcia z uwagi na zmienny, charakterystyczny dla każdego absorbera przebieg siły zgniatania $F(q)$.

W procesie adaptacji konstrukcji do uderzenia wyróżnić można trzy główne fazy: identyfikację obciążenia, przyjęcie optymalnej strategii rozpraszania energii oraz adaptację aktywnych elementów struktury.

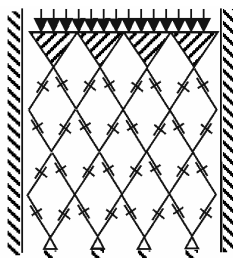
Identyfikacja obciążenia może odbywać się przed uderzeniem lub na jego początku. W pierwszym przypadku konieczny jest pomiaru prędkości i szacowanie masy ciał biorących udział w zderzeniu. W drugim przypadku należy stosować czujniki wbudowane w strukturę absorbera, które są w stanie rozpoznać uderzenie na podstawie początkowych deformacji.

Optymalna strategia dyssypacji poza zapewnieniem całkowitego rozproszenia energii kinetycznej musi prowadzić do jak najłagodniejszego przyjęcia uderzenia przez konstrukcję. Ze względu na bardzo krótki czas uderzenia, w absorberze adaptacyjnym muszą znaleźć się układy sterujące, zawierające w zależności od przyjętej strategii sterowania, przygotowane wcześniej lub tworzone w czasie rzeczywistym scenariusze dyssypacji.

Po wyborze odpowiedniej strategii konieczne jest dostosowanie do obciążenia aktywnych elementów absorbera (tzw. bezpieczników). W zależności od przyjętego rodzaju sterowania, zmiany parametrów kontrolnych można przeprowadzić jednokrotnie w przypadku sterowania semi-aktywnego lub wielokrotnie przy sterowaniu aktywnym.

2. Absorpcyjne struktury mechaniczne typu harmonijkowego (multifolding MFM).

Absorpcyjna struktura typu MFM składa się z elementów ułożonych w dwu- lub trójwymiarowy periodyczny wzór (rys. 1), zdolnych do przenoszenia sił w kierunku osiowym [3].

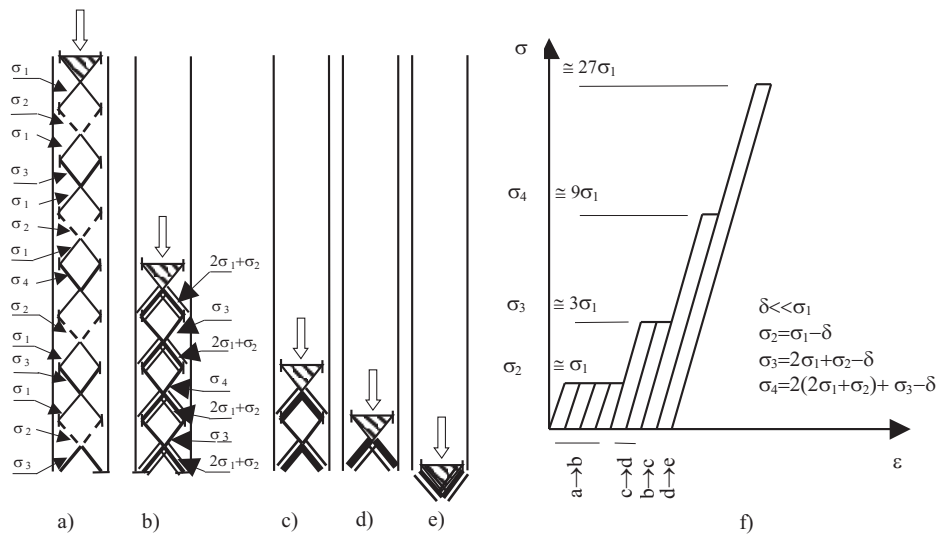


Rys. 1. Adaptacyjna struktura typu harmonijkowego (multifolding – MFM).

Każdy z elementów struktury może podlegać sterowaniu i wyposażony jest w mikrobezpiecznik pozwalający na zmianę wartości siły osiowej elementu. Jednym z

zaproponowanych w naszych badaniach rozwiązań jest wykonanie bezpiecznika, którego głównym elementem są cienkie podkładki ze stopów z pamięcią kształtu (SMA), połączone ze sprężystym dociskiem. Poprzez zmianę wymiarów różnej liczby podkładek (wywołaną przemianami w strukturze materiału) możliwa jest zmiana siły w mikrobezpieczniku, a co za tym idzie siły tarcia pomiędzy dwoma częściami elementu struktury MFM. Zachowanie takiego układu odpowiada procesowi plastycznego płynięcia ze sterowalną granicą plastyczności.

Przykładowy proces odkształcenia jednej kolumny materiału badanej struktury złożonej z piętnastu warstw elementów przedstawiono na rys. 2 (a – e), na którym σ oznacza granice plastyczności elementów struktury.



Rys. 2. Model struktury MFM: (a – e) proces deformacji, f) charakterystyka sztywności.

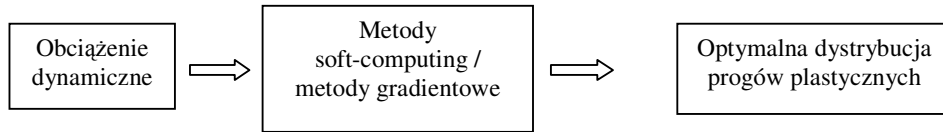
W każdej z konfiguracji jako pierwsze składają się elementy o najniższej w całej kolumnie granicy plastyczności. Charakterystyka sztywności struktury została przedstawiona na rys. 2 f. Nie jest ona stała i w ścisły sposób zależy od przyjętej dystrybucji granic plastyczności. Poprzez odpowiedni ich dobór można dostosować zachowanie MFM do obciążenia udarowego.

3. Strategie sterowania struktur MFM.

W przypadku struktur MFM zaproponowano dwie strategie sterowania: semi-aktywną oraz aktywną. W pierwszej z nich parametrami kontrolnymi bezpieczników są wartości i rozkład granic plastyczności w elementach struktury MFM, które są stałe w czasie uderzenia. W strategii aktywnej, parametry kontrolne podlegają zmianie w czasie rzeczywistym.

W sterowaniu semi-aktywnym dla danego obciążenia dynamicznego zminimalizowana jest funkcja celu f będącą różnicą pomiędzy wartością przyspieszeń $\ddot{q}_i(t)$ w wybranych punktach „i” struktury, a założoną, optymalną odpowiedzią $\ddot{q}_i^d(t)$:

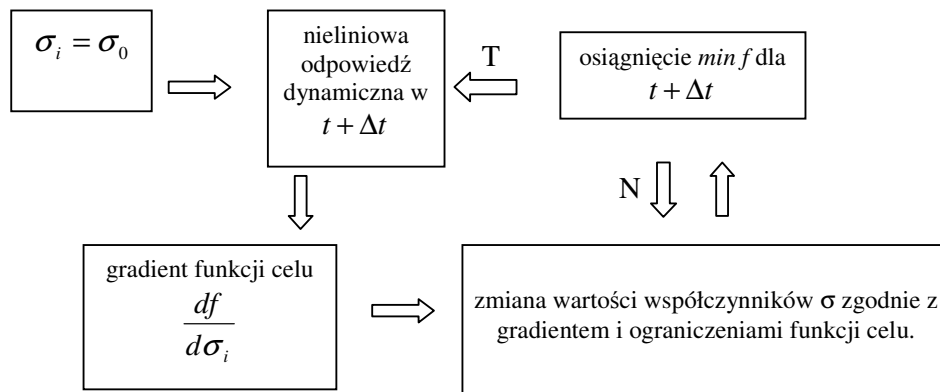
$$\min f = \sum_t \sum_i [\ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_i^d(t)]^2$$
, zsumowaną w całym przedziale czasowym przy ograniczeniach nałożonych na sterowanie granicą plastyczności $|\sigma_i| \in \langle \sigma_{\min}, \sigma_{\max} \rangle$ i maksymalne przemieszczenie: $\max\{q_i\} \leq q_{\max}$. Algorytm sterowania semi-aktywnego przedstawiono na rys.3.



Rys 3. Algorytm sterowania semi-aktywnego struktury MFM.

W przypadku sterowania aktywnego dla danego obciążenia dynamicznego funkcją celu jest różnica dla każdego kroku czasowego pomiędzy wartością przyspieszeń $\ddot{q}_i(t)$ w wybranych punktach struktury a założoną, optymalną odpowiedzią $\ddot{q}_i^d(t)$: $\min f = \sum_i [\ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_i^d(t)]^2$.

Ograniczenia sterowania są analogiczne jak w przypadku semi-aktywnym. Algorytm sterowania aktywnego dla jednego kroku czasowego, podano na rys. 4.



Rys. 4. Algorytm sterowania aktywnego MFM.

Problem sterowania w przypadku semi-aktywnym polega na dobraniu granic plastyczności w sposób, który zapewnia minimalizację ekstremalnych przyspieszeń obciążonego węzła. W przypadku strategii aktywnego sterowania, w każdym kroku

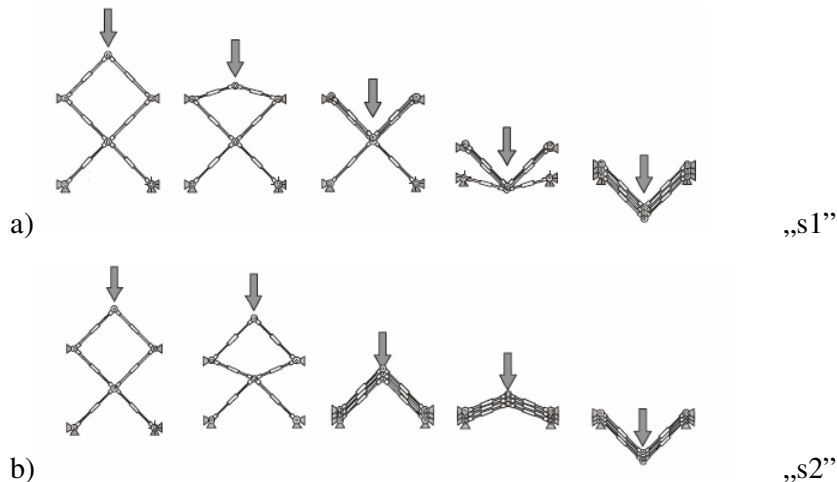
czasowym procedura optymalizacyjna dobiera granicę plastyczności tak, aby przyspieszenie kontrolowanego węzła było jak najbliższe założonej, pożądanej odpowiedzi (dobierana analitycznie, przedziałami ciągła funkcja o stałej wartości).

4. Symulacja numeryczna strategii sterowania

Do obliczeń symulacyjnych przyjęta została sześcieelementowa struktura typu harmonijkowego MFM (rys. 5) posiadająca dwa parametry sterowania: wartość granicy plastyczności σ_1 w elementach warstw górnej i dolnej (oznaczenie "1") oraz wartość granicy plastyczności σ_2 w elementach warstwy środkowej (oznaczenie "2")

Analiza została przeprowadzona przy użyciu metody elementów skończonych połączonej z procedurami optymalizacyjnymi. Ograniczenia zostały nałożone na minimalne i maksymalne wartości naprężeń oraz maksymalną wartość wzmocnienia w elementach. Maksymalne dopuszczalne przemieszczenie obciążonego węzła jest równe czterokrotnej wysokości pojedynczej warstwy. Uderzenie modelowane było poprzez przyłożenie skupionej masy z początkową prędkością v_0 . Optymalna strategia poszukiwana była dla różnych, liniowo rosnących wartości energii kinetycznej.

Podstawowa struktura MFM z dwoma parametrami sterowania posiada dwie podstawowe sekwencje składania (rys.5).

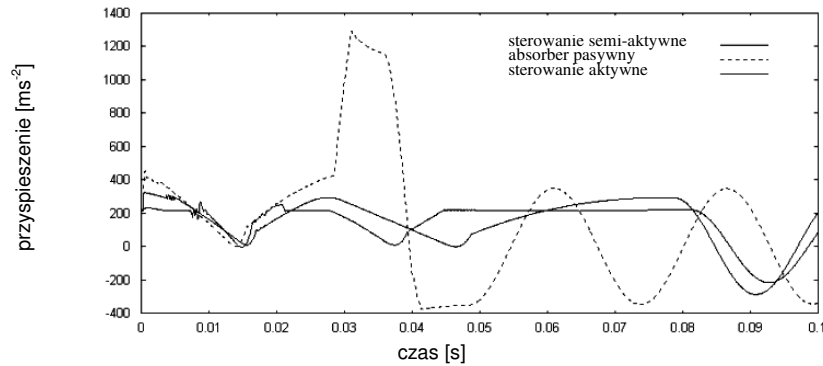


Rys. 5. Deformacje struktury MFM a) sekwencja składania „s1”, b) sekwencja składania „s2”

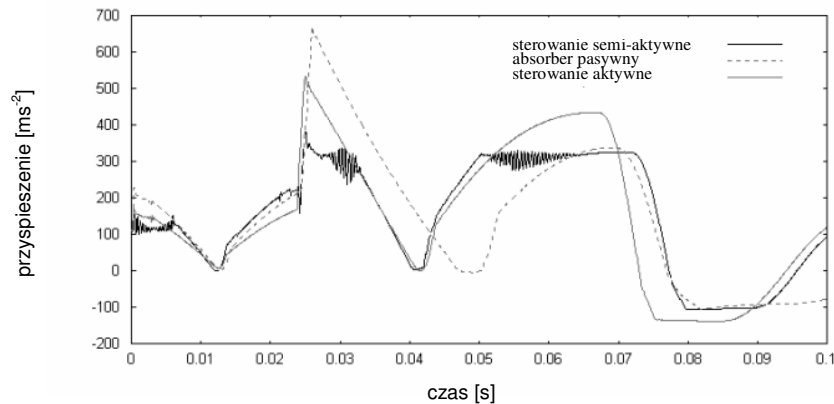
W pierwszej z nich (“s1”), zapewniającej bardziej łagodną odpowiedź dynamiczną, lecz ograniczoną możliwość absorpcji energii, naprężenia sterujące w elementach warstwy środkowej są wyższe niż w elementach warstwy górnej i dolnej.

Przeciwna relacja progów plastycznego płynięcia prowadzi do sekwencji oznaczonej „s2”, która zapewnia maksymalny poziom dyssypacji energii uderzenia.

Wyniki zastosowania optymalnej strategii adaptacji dla dwóch uderzeń o różnej energii kinetycznej zaprezentowano na rys. 6 i rys. 7, które przedstawiających przebieg przyspieszenia obciążonego węzła w czasie uderzenia dla strategii sterowania semi-aktywnego, aktywnego oraz dla absorbera pasywnego.



Rys. 6. Przyspieszenia obciążonego węzła dla różnych strategii sterowania.



Rys. 7. Przyspieszenia obciążonego węzła dla różnych strategii sterowania w przypadku zwiększonej energii kinetycznej.

W przypadku pierwszego uderzenia (rys.6) struktura MFM adaptuje się do obciążenia poprzez wybór progów plastycznych wywołujących sekwencję deformacji „s1”. W drugim przypadku (rys.7), przyjęto zwiększoną dwukrotnie energię kinetyczną udaru, co spowodowało przekroczenie dopuszczalnych wartości przemieszczeń i przyjęcie w procesie optymalizacji sekwencji „s2”. W obu przypadkach wyraźnie widoczne jest znaczące obniżenie poziomu oddziałujących przyspieszeń w stosunku do konstrukcji pasywnej.

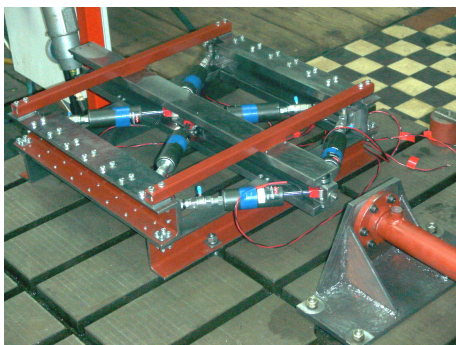
5. Badania eksperymentalne struktury typu MFM

W celu eksperymentalnego zweryfikowania koncepcji zastosowania struktur MFM w układach dyssypacji energii uderu oraz modelowania numerycznego i optymalizacji, zbudowane zostało stanowisko badawcze przedstawione na rys. 8.

Badaniom poddano opracowaną strukturę MFM, składającą się z sześciu elementów, które wykonane są z tłumików typu Lord RD-1005-3 zawierających ciecz magnetoreologiczną. Ciecze te są zawiesiną ferromagnetycznych cząstek metalicznych w cieczy bazowej, które pod wpływem przyłożonego zewnątrz pola magnetycznego łączą się w ukierunkowane łańcuchy, zmieniając zachowanie cieczy z lepkiego na lepko-plastyczne o naprężeniu granicznym zależnym od wartości działającego pola.

Zastosowanie tego typu rozwiązania zapewniło szybkie sterowanie siłą we wszystkich elementach konstrukcji poprzez zmiany natężenia prądu elektrycznego w obwodach magnetycznych tłumików.

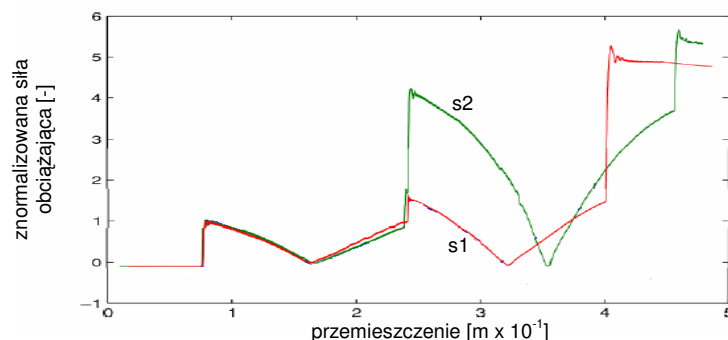
Konstrukcja stanowiska pozwala na przemieszczenie węzłów w kierunku działania obciążenia, które przykładane jest przy pomocy siłownika hydraulicznego w szczytowym węźle struktury. Wszystkie elementy oraz obciążony węzeł zostały wyposażone w piezoelektryczne czujniki siły. Rejestracji podlegają również przemieszczenia ruchomych węzłów struktury.



Rys. 8. Widok stanowiska eksperymentalnego struktury MFM.

Wyniki eksperymentu wykazały, że możliwe jest dostosowanie zachowania badanej konstrukcji MFM do charakterystyki dynamicznej działającego obciążenia. Poprzez odpowiedni dobór parametrów sterujących tłumików magnetoreologicznych możliwe było uzyskanie podstawowych sekwencji składania „s1” oraz „s2”.

Przebieg siły działającej na obciążony węzeł konstrukcji, znormalizowanej do pierwszego maksimum przebiegu, w funkcji przemieszczenia dla deformacji typu „s1” oraz „s2” przedstawiono na rys.9.



Rys. 9. Przebieg siły obciążającej w funkcji przemieszczenia.

Przebieg odpowiedzi struktury MFM w obu przypadkach, odpowiada charakterystykom uzyskanym w wyniku symulacji numerycznej (rys.6-7).

6. Wnioski

Przeprowadzone wstępne symulacje oraz badania doświadczalne wykazały, że mechaniczne struktury harmonijkowe MFM mogą być efektywnie wykorzystywane w układach dyssypacji energii

W przypadku sterowania semi-aktywnego wyraźne jest znaczne ograniczenie poziomu przyspieszeń w stosunku do absorberów typu pasywnego. Zastosowanie sterowania aktywnego powoduje dalszy (20%-30%) spadek przyspieszeń oraz złagodzenie odpowiedzi układu. Zastosowanie struktur o dużej liczbie kolumn i warstw, w znaczącym stopniu zwiększa możliwości absorpcyjne oraz zakres adaptacji do obciążenia.

Literatura

1. Holnicki-Szulc J.(ed.), *Smart Technologies for Safety Engineering*, J.Wiley, 2008
2. Macaulay M.A., *Impact Engineering*, Chapman and Hall 1987
3. Holnicki-Szulc J., Pawłowski P., Wikło M.: "High-performance impact absorbing materials - the concept, design tools and applications", *Smart Materials and Structures*, vol.12, number 3 (2003)

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 (PKAERO) w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.