

KONSTRUKCJE INTELIGENTNE

ANDRZEJ TYLIKOWSKI

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska
e-mail: *aty@simr.pw.edu.pl*

Ostatnie lata przyniosły rozwój nowych konstrukcji kompozytowych zwanych *konstrukcjami inteligentnymi* (smart structures). Są to konstrukcje takie jak pręty, wały, płyty, powłoki zawierające obok klasycznej części nośnej rozłożone na powierzchni lub wewnątrz czujniki, elementy wykonawcze i elementy układu sterowania a nawet układ zasilania. Nie chodzi tu więc o klasyczną konstrukcję z punktowym pomiarem przyspieszeń i również punktowym wzbudnikiem drgań. Rozwój inżynierii materiałowej spowodował dostępność nowych materiałów i możliwość ich stosowania w budowie maszyn i konstrukcji. Dostępność zaawansowanych materiałów sprzyjała w ostatnich latach rozwojowi tych hybrydowych konstrukcji kompozytowych.

Podczas Warsztatów National Science Foundation w Williamsburgu, Virginia, 1993, przyjęto, że inteligentnym układem lub konstrukcją nazywa się strukturę inżynierską o znacznym stopniu autonomii, która umożliwia optymalne działanie, zapewnia adaptacyjną funkcjonalność i minimalizuje globalny koszt (obejmujący produkcję, obsługę, eksploatację i złomowanie).

Początki konstrukcji inteligentnych związane są z rozwiązywaniem w połowie lat osiemdziesiątych trzech zadań:

- sterowania i tłumienia drgań mechanicznych dużych stacji orbitalnych, które charakteryzowały się niskimi współczynnikami tłumienia biernego,
- monitorowaniem stanu konstrukcji lotniczych,
- aktywne tłumienie hałasu emitowanego przez łodzie podwodne.

Pierwsze próby analizy i doświadczalnej weryfikacji konstrukcji z rozłożonymi tłumikami drgań w postaci *piezoelektryków* (folii) (PVF₂) zostały opisane

przez Bailey'a i Hubbarda (1985). Wykorzystano prosty i odwrotny poprzeczny efekt piezoelektryczny opisany równaniem

$$\epsilon = \frac{d_{13}U}{h}$$

gdzie ϵ jest odkształceniem względnym, U jest przyłożonym napięciem w kierunku prostopadłym do obserwowanego odkształcenia, h jest grubością piezoelektryka, d_{13} jest stałą piezoelektryczną. Daje to możliwość pomiaru odkształceń na powierzchni belki, a następnie po przetworzeniu sygnału, wymuszenia (np. na przeciwnej powierzchni belki) pożądanych odkształceń. W szczególności układy inteligentne mogą być stosowane do aktywnego tłumienia drgań (Newman, 1991). Zaletą rozłożonych czujników drgań, jakimi są płyty piezoelektryka, jest globalny pomiar i unikanie szczególnych lokalizacji. Ze względu na wymagane wymuszenie siłowe na elementy wykonawcze stosowane są materiały piezoceramiczne o symbolach handlowych PZT. Są one znacznie większej grubości w porównaniu z foliami PVF₂ i mają większą gęstość co może prowadzić do konieczności uwzględniania ich masy w równaniach ruchu układu.

Zagadnieniom tłumienia drgań swobodnych, doborowi odpowiedniego sprzężenia zwrotnego (najczęściej proporcjonalnego do prędkości odkształcenia względnego), uwzględnienia właściwości warstwy klejącej, wpływowi częstości drgań poświęcona jest między innymi praca Crawley'a i de Luisa (1987). Wpływ warstwy łączącej (kleju) na dynamikę układu belka – piezoelektryczny element wykonawczy został przeanalizowany w pracy Tylikowskiego (1993b). Interesujący przykład zastosowania tego samego elementu piezoelektrycznego do pomiaru i wymuszenia ruchu został opisany w Dosch i in. (1992). Rozwijane są wyspecyfikowane metody elementów skończonych nadające się do analizy hybrydowych konstrukcji złożonych z klasycznych materiałów i piezoelektryków (Chandrashekar'a i Agarwal, 1993). Zastosowaniu piezoelektryków do tłumienia drgań parametrycznych pręta wywołanych osiąwą harmoniczną siłą poświęcona jest praca Tylikowskiego (1993a). Wykazano w niej za pomocą metody funkcjonalów Lapunowa, że prędkościowe sprzężenie zwrotne zmniejsza energię belki, mogąc w końcowym efekcie zbilansować energię dostarczaną przez wymuszenie parametryczne i energię rozpraszaną przez tłumienie pasywne i aktywne. Analizie układu płyta – piezoelektryczny element wykonawczy, traktowanego jako kontinuum dwuwymiarowe, poświęcona jest praca Dimitriadisa i in. (1991). Możliwość stabilizacji drgań parametrycznych inteligentnej płyty wraz z rozłożonymi elementami pomiarowymi i wykonawczymi była wykazana w pracy Tylikowskiego (1996). W szczególności zajęto się aktywnym tłumieniem flateru powłokowego (Tylikowski, 1997a).

Innym przykładem zastosowania piezoelektrycznych elementów warstwowych jest próba aktywnego tłumienia drgań skrętnych wałów (Sung i in., 1990; Przybyłowicz, 1995; Kurnik i in., 1995). Intensywnie rozwijane są zastosowania koncepcji układów inteligentnych w wiropłatach. Celem tych badań jest zbudowanie jednego układu sterowania lopatami wirnika zapewniającego sterowanie lotu śmigłowca. Badane są możliwości wykorzystania sterowania procesorowego elementów aktywnych będących integralną częścią lopaty wirnika w celu uzyskania poprawy osiągnięć, eliminacji i stabilizacji drgań oraz wyciszenie pracy (Spangler, 1990). Piezoelektryczne rury zostały użyte do konstrukcji aktywnych prętów mogących zmieniać odpowiednio szybko swoją długość, będących elementami kratownic. Te kratownice – mechanizmy są elementami mechanizmów dokujących, masztami podtrzymującymi anteny kierunkowe lub elementami stacji orbitalnych.

Piezoelektryczne elementy już wielokrotnie były używane jako elementy wykonawcze – wzbudniki w układach otwartych i zamkniętych układach inteligentnych (adaptacyjnych, aktywnych). Zaletami piezoelektrycznych wzbudników i elementów pomiarowych jest szerokopasmowość przenoszonych sygnałów, wysoka sprawność zamiany energii mechanicznej na elektryczną (i odwrotnie), możliwość łatwego kształtowania elementów do potrzeb projektanta i prostota układu.

Istotę odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego wykorzystywanego w elementach wykonawczych można opisać rozpatrując prostopadłościenny element piezoelektryczny o długości l , szerokości b i grubości h . Jeżeli napięcie między górną i dolną powierzchnią przewodzącą piezoelektryka jest równe zero prostopadłościenny element jest w stanie nieodkształconym. Kierunek polaryzacji piezoelektryka jest skierowany pionowo ku górze. Gdy napięcie U przyłożone do elektrod jest przeciwne do kierunku polaryzacji, to wskutek odwrotnego wzdluznego efektu piezoelektrycznego grubość wzrasta do $h + \Delta h$. Poprzeczny odwrotny efekt piezoelektryczny powoduje zmniejszenie szerokości do $b - \Delta b$ oraz długości do $l - \Delta l$. Jeżeli kierunek napięcia U i polaryzacji są zgodne, to grubość maleje do $h - \Delta h$, a wymiary poprzeczne: szerokość i długość odpowiednio rosną.

Efekt ten jest wykorzystywany do oddziaływania na układ ciągły. Górną i dolną płytkę lub folię piezoelektryczną o tym samym kierunku przyklejono do belki i poddano działaniu napięcia. Jeżeli przyłożone napięcia mają przeciwne kierunki polaryzacji to górna warstwa zmniejsza swoją długość a dolna wydłuża się oddziaływanie sił stycznych między belką a warstwami piezoelektryka ustala równowagę. Otrzymane przy różnych założeniach i stopniach uproszczenia wyniki różnią się jedynie czynnikiem C_0 zależnym od geometrii i stałych materiałowych i wskazują, że piezoelektryki odkształcają powierzch-

nie belki powodując jej zginanie. W ten sposób rozłożone elementy w fazie przeciwnej tylko zginają konstrukcję, do której są przytwierdzone ze względu na brak siły osiowej (czyste zginanie). Związek między wymuszonym na powierzchniach górnej i dolnej belki odkształceniu a odkształceniem piezoelektrycznego elementu wykonawczego zależy również od modułu ścinania warstwy klejącej G_s i częstości drgań. Generalnie pomijane są efekty dynamiczne i przyjmuje się proporcjonalność odkształceń powierzchni belki ϵ_p i elementu wykonawczego ϵ_s

$$\epsilon_p = C_0 \epsilon_s$$

Układem równoważnym zastępującym elementy wykonawcze jest para momentów rozłożonych na linii prostopadłej do osi belki.

Prosty efekt piezoelektryczny wykorzystany jest w rozłożonych elementach pomiarowych. Jeżeli przyjąć, że przyłożone napięcie jest równe zero, to przesunięcie elektryczne wywołane naprężeniami wymuszonymi przez konstrukcję, do której przyklejony jest element pomiarowy, jest równe

$$D_3 = -d_{31} \epsilon_s E_p$$

Na podstawie elementarnej teorii belek odkształcenia elementu pomiarowego są proporcjonalne do krzywizny belki i odległości od osi obojętnej. Zatem całkując przesunięcie dielektryczne po powierzchni czujnika obliczamy ładunek elektryczny. Wprowadzając pojemność C czujnika można wyznaczyć napięcie indukowane pomiędzy elektrodami elementu pomiarowego. Element pomiarowy można dostosować do konkretnej konstrukcji lub jej zadań poprzez dobór położenia i kształtu piezoelektryka.

Pełne równanie konstytutywne piezoelektryków jest bardziej złożone, gdyż macierz kolumnowa przesunięć dielektrycznych \mathcal{D}_i (prosty efekt piezoelektryczny opisujący element pomiarowy) zależy nie tylko od macierzy kolumnowej odkształceń mechanicznych ϵ_q lecz także od pola elektrycznego \mathcal{E}_i

$$\mathcal{D}_i = e_{iq} \epsilon_q + \epsilon_{ik}^s \mathcal{E}_k$$

gdzie e_{iq} jest macierzą stałych piezoelektrycznych, ϵ_{ik}^s jest macierzą przenikalności elektrycznej przy stałych odkształceniach, $i, k = 1, 2, 3$ oraz $p, q = 1, 2, \dots, 6$.

Równanie elementu wykonawczego związane z odwrotnym efektem piezoelektrycznym ma postać

$$\epsilon_p = s_{pq}^E \sigma_q + d_{ip} \mathcal{E}_i$$

gdzie s_{pq}^E jest macierzą podatności przy stałym polu elektrycznym, d_{ip} jest macierzą odkształceniowych stałych piezoelektrycznych oraz σ_q jest macierzą

kolumnową naprężeń. Warto jeszcze przypomnieć, że w równaniach konstytutywnych zastosowano uproszczoną notację zmniejszającą wymiar i liczbę składowych pola naprężeń, odkształceń, przesunięć elektrycznych i pola elektrycznego.

Uzupełnienie elementu pomiarowego i wykonawczego układem sterującym (analogowym lub cyfrowym) sprzęga układ i rozwiązuje ogólną koncepcję konstrukcji inteligentnej. Piezoelektryczny element pomiarowy wyznacza sygnał proporcjonalny do średniej krzywizny, regulator (procesor) generuje odpowiedni wzmocniony sygnał, który poprzez piezoelektryczny element wykonawczy stabilizuje drgania. Dość często stosuje się tu regulator różniczkujący, który zapewnia rozproszenie energii mechanicznej i jest wygodny w teoretycznych dowodach stabilizacji.

Innym elementem wykonawczym możliwym do zastosowania w układach inteligentnych są włókna lub druty wykonane ze *stopów z pamięcią kształtu*. Stopy te mają unikatowe właściwości polegające między innymi na zapamiętywaniu kształtu i dramatycznej jego zmianie wraz ze zmianą temperatury. Kształt geometryczny elementu w fazie austenitycznej (przy podwyższonej temperaturze) jest kształtem zapamiętywanym. Martenzyt tworzy się podczas chłodzenia a moduł sprężystości jest nawet kilkakrotnie mniejszy (Cross i in., 1970) od modułu fazy austenitycznej. Dlatego też niskim naprężeniom towarzyszą znaczne odkształcenia. Odkształcony element zachowuje swój kształt tak długo jak temperatura będzie poniżej temperatury przemiany martenzytycznej. Jeżeli odkształcony element jest ogrzany powyżej temperatury przemiany przechodzi w fazę austenityczną (rośnie moduł sprężystości) i odzyskuje zapamiętany kształt. Odzyskane odkształcenia mogą sięgać 7%. Jeżeli ogrzewany element jest zamocowany tak, że nie może całkowicie lub częściowo powrócić do zapamiętanego kształtu generują się znaczne naprężenia, które mogą być wykorzystane w konstrukcji do zmiany stanu energetycznego, zmiany sztywności itp. Czysty martenzyt charakteryzuje się wyższym współczynnikiem tłumienia niż austenit. W trakcie samej przemiany jednak współczynnik tarcia wewnętrznego gwałtownie wzrasta, aby po przejściu w austenit osiągnąć małe wartości. Inteligentne konstrukcje kompozytowe zawierają (Rogers i in., 1989) zatopione obok włókien klasycznych węglowych lub aramidowych w osnowie kompozytu. Wykorzystuje się tu duże wartości sił restytucyjnych towarzyszących przemianie martenzytyczno-austenitycznej pewnych stopów metali. Bardzo rozpowszechnionymi stopami z pamięcią kształtu są stopy niklu i tytanu (Nitinol) oraz stopy miedzi, cynku i aluminium. Opracowywane są wyspecjalizowane elementy skończone nadające się do obliczeń numerycznych konstrukcji z warstwami lub włóknami z materiału z pamięcią kształtu (Krawczuk i in., 1997).

Wadą elementów wykonawczych z materiałów z pamięcią kształtu w stosunku do piezoelektryków są niskie częstości pracy. W związku z tym używa się włókna lub druty zatopione w kompozycie do zmiany sił membranowych. Umożliwia to modyfikację częstości własnych hybrydowych (złożonych z klasycznych węglowych lub szklanych włókien oraz warstw z włóknami wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu) prętów, płyt i powłok dostosowując je do warunków pracy. W szczególności zmieniając charakterystyki dynamiczne w obszarach rezonansowych obniża się poziom drgań mechanicznych konstrukcji. Zjawisko to można również zastosować do zmian emisji akustycznej przez wzbudzane elementy powierzchniowe (Anders i Rogers, 1991). Wpływ zmiany fazy stopu z pamięcią kształtu na stateczność hybrydowych wałów napędowych i powłok cylindrycznych zbadana była w pracy Tylikowskiego (1997b). W większości prac traktujących o zastosowaniach włókien ze stopu z pamięcią kształtu badano stan konstrukcji w niskich lub podwyższonych temperaturach, przy całkowitym pominięciu zachowaniu się konstrukcji w trakcie przemiany martenzytycznej. Próby analizy elementów wykonawczych z warstwą nitinolu w trakcie przemiany dokonał Wu i in., (1996). Elementy kompozytowe zawierające stopy z pamięcią kształtu stosowane są do budowy chwytaków manipulatorów i robotów. Proponowane jest zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu do projektowania rur koncentrycznych, których warstwy zewnętrzne po aktywacji powodowałyby zmniejszenie naprężeń rozciągających w warstwie wewnętrznej prowadząc do ujednorodnienia rozkładu naprężeń i zmniejszenia wyężenia w strefach niebezpiecznych. Wykorzystanie zjawiska usztywnienia konstrukcji hybrydowych wałów kompozytowych przy jednoczesnym zmniejszeniu tłumienia wewnętrznego przy podwyższonej temperaturze zaproponowane przez Kurnika (1995) prowadzi do wewnętrznego ujemnego sprzężenia zwrotnego stabilizującego ruch i drgania wałów.

Materiały elektreologiczne w postaci zawiesin zmieniające właściwości w polu elektrycznym znane są w nauce od publikacji Winsłowa (1949), jednak dopiero w latach osiemdziesiątych w związku z ich dostępnością handlową pojawiły się liczne zastosowania w sterowanych zaworach, zawieszaniach maszyn (Korobko i Mokeev, 1991), tłumikach uderzeń i stołach wibracyjnych. Trwają próby ich zastosowania w sprzęgłach i hamulcach. Laminaty kompozytowe składać się mogą z warstw metalowych, lub z mas plastycznych rozdzielonych warstwami cieczy elektreologicznej.

Istotne zmiany właściwości spowodowane są elektrycznie indukowanym tworzeniem się włókien cząstek półprzewodnikowych w cieczy. Cząstki zachowują się jak dielektryki i dlatego też tworzą łańcuchy cząstek w kierunku pola elektrycznego. Kiedy materiał (ciecz) poddajemy ścinaniu z prędkością dodatkowa energia jest potrzebna do zerwania tych więzów między cząstkami,

jak również do przewyciężenia sił tnących towarzyszących lepkiem efektem. Strukturyzacja cieczy elektroteologicznych jest stabilna w czasie. Powoduje to zmianę podstawowych właściwości cieczy, a zwłaszcza jej lepkości. Tak więc w stanie naturalnych cieczy elektroteologicznych ma niski współczynnik lepkości i zachowuje się podobnie jak woda, a w stanie aktywowanym po przyłożeniu napięcia jest żelem o znacznej sztywności i dużej lepkości.

Właściwości cieczy elektroteologicznych mogą być zmieniane w odpowiedni sposób poprzez przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego. Ich szybkość i odwracalność powodują możliwość zastosowania cieczy w urządzeniach sterujących w czasie rzeczywistym.

Grubość warstwy cieczy wyznaczona odległością elektrod jest niewielka rzędu mm. Naprężenie płynięcia jest funkcją liniową i zmienia się z kwadratem przyłożonego napięcia. Podstawowym parametrem jest lepkość pozorna. Zmiany właściwości są szybkie, gdyż stała czasowa jest rzędu 0.01 s (Hill i Van Steenkiste, 1991) i odwracalne po odłączeniu pola. Opisywane próby wykazywały stałość właściwości reologicznych nawet po 200 tysiącach przełączeń. Po działaniu pola elektrycznego materiał opisać można modelem Bingham'a z naprężeniem ścinania. Ciecze elektroteologiczne są zawiesinami w dielektrycznych cieczach z dodatkiem aktywatorów. Popularnymi podstawowymi składnikami były cząsteczki skrobi kukurydzianej w oleju kukurydzianym z wodą jako substancją aktywującą. Woda jednak zwiększała pobór mocy ze względu na mniejszy opór elektryczny. Obecnie stosowane ciecze elektroteologiczne składają się z oleji mineralnych lub sztucznych z zawiesiną z tworzywa sztucznych lub ceramiczną.

Właściwości materiałów elektroteologicznych zależą od rodzaju i składu procentowego składników podstawowych zawiesiny i specjalnych aktywatorów, wielkości i częstości pola elektrycznego, wielkości cząstek, temperatury (Block i Kelly, 1988). Optymalna koncentracja cząstek waha się w granicach $10 \div 40\%$, pozwala ona na uzyskanie naprężenia ścinania \sim kPa przy napięciu \sim kV/mm. Przy udziale poniżej 10% nie obserwuje się indukowanego elektrycznie wzrostu lepkości, a wysoka koncentracja powoduje utratę płynności i zwiększa tendencje do kontaktu między cząstkami, który może być na tyle intensywny, że może prowadzić do zwarcia. Kształt i rozmiar cząstki nie mają większego wpływu na zachowanie reologiczne materiału w stanie aktywowanym. Wysoka koncentracja sprzyja również rozwarstwianiu cieczy i cząstek. Stosowane pole elektryczne waha się do $1.5 \div 3$ kV/mm i jest ograniczone od góry napięciem przebicia dielektryka, jednak już przy napięciach znacznie niższych od napięcia przebicia następuje nasycenie funkcji naprężenia ścinania. Należy zauważyć, że prąd jest niewielki jak również i moc zasilania. Wpływ temperatury jest złożony i zależy od składu materiału. Jeżeli woda

jest aktywantem obserwujemy znaczny spadek lepkości względnej zarówno w wysokich jak i niskich temperaturach. Spowodowane jest to tworzeniem się komórek lodowych w temperaturach ujemnych lub odparowaniem w temperaturach powyżej 70°C co powoduje spadek wody w materiale. Wadami innych materiałów mogą być niebezpieczeństwo zapłonu, możliwość ścierania powierzchni elektrod przez odkładające się cząstki lub właściwości sprzyjające korozji powierzchni elektrod. Materiały elektoreologiczne typu zawiesiny mogą być stosowane zarówno przy przemieszczeniach ścinających jak i normalnych do powierzchni elektrod, gdzie wykorzystuje się zjawisko wyciskania materiału o zmienionych właściwościach.

Druga grupa materiałów elektoreologicznych to ciekłe kryształy, które co prawda charakteryzują się mniejszym wzrostem lepkości pozornej pod działaniem pola elektrycznego, lecz są jednorodne, bardziej stabilne i nie mają tendencji do rozwarstwiania. Działające pole elektryczne służy do orientacji igielkowych molekuł kryształu. Przy odpowiedniej reorientacji molekuł kryształu zmienia się zarówno podatność jak i lepkość tego materiału. Materiał można zamodelować jako ciało Voigta-Kelvina o parametrach będących funkcją przyłożonego napięcia.

Aktywne tłumienie drgań można osiągnąć poprzez zastosowanie cieczy elektoreologicznych umieszczonych w specjalnie wykonanych kanałach wewnątrz konstrukcji (Weiss i in., 1993).

W ostatnich latach pojawiło się wiele prac (Berg i inni, 1996; Choi i in., 1996; Haiqing i in., 1993), w których zaproponowano nową konstrukcję płyty laminowanej z obszarami wypełnionymi materiałami elektoreologicznymi. Takie konstrukcje belek i płyt typu "sandwich" zawierających materiały o sterowalnych właściwościach potwierdziły teoretyczne wnioski o możliwości ich zastosowania do tłumienia drgań tych elementów konstrukcyjnych. Szeroko prowadzone badania pokazały możliwości adaptowania charakterystyk częstotliwościowych do wymuszeń zewnętrznych (Clack i in., 1994), zmiany częstości drgań konstrukcji. Badania doświadczalne potwierdziły również możliwość szybkiej adaptacji właściwości konstrukcji (Coulter i in., 1993; Don i Coulter, 1995). W konstrukcjach belek półaktywnych korzystano z materiałów elektoreologicznych dostosowanych do zasilania prądem stałym (ER-III) i prądem zmiennym (ER-200) (Shiang i Coulter, 1996). Przeprowadzono również badania doświadczalne potwierdzające możliwości tłumienia drgań za pomocą tłumików z ciekłymi kryształami (Tani i in., 1996), podczas których badano wpływ aktywacji tłumika na drgania swobodne i drgania parametryczne.

Ostatnim przykładem, nie wyczerpującym bogatej listy, nowego materiału stosowanego przy aktywnym tłumieniu drgań jest *nafion*, w którym

wskutek zmiany ciśnienia wodoru po obu stronach elementarnego ogniwa elektrochemicznego towarzyszącemu odkształceniom wytwarza się różnica potencjałów. Stosując wewnętrzne lub zewnętrzne oporniki można rozpraszać energię mechaniczną (Sadeghipour i in., 1992).

Bieżącej kontroli stanu elementów kompozytowych maszyn i konstrukcji mogą służyć szklane *włókna światłowodowe* umieszczone obok nośnych włókien węglowych. Lokalne uszkodzenia kompozytu, propagowanie się szczelin, delaminacja prowadzą do pęknięcia włókien zmniejszając natężenie światła przewodzonego przez światłowody. Tworzą one zatem system monitorujący stan wytrzymałościowy konstrukcji mogący pracować *on line* lub podlegający okresowej kontroli. Monitorowanie stanu jest już stosowane w eksperymentalnych konstrukcjach lotniczych. W związku z programem budowy nowych mostów, wiaduktów i pasów startowych w Stanach Zjednoczonych w ciągu dwudziestolecia planowane jest monitorowanie ich stanu wytrzymałościowego.

Literatura

1. ANDERS W.S., ROGERS C.A., 1991, Vibration and Low Frequency Acoustic Analysis of Piecewise-Activated Composite Panels, *Proceedings of First Joint U.S./Japan Conference on Adaptive Structures*, Red. B.K. Wada, J.L. Fanson, Koryo Miura, Technomic Publishing, Lancaster-Basel, 285-303
2. BAILEY T., HUBBARD J.E., JR., 1985, Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam, *J. Guidance, Control and Dynamics*, **8**, 605-611
3. BAZ A., POH S., RO J., GILHEANY J., 1995, Control of the Natural Frequencies of Nitinol-Reinforced Composite Beams, *Journal of Sound and Vibration*, **185**, 171-185
4. BERG C.D., EVANS L.F., KERMODE P.R., 1996, Composite Structure Analysis of a Hollow Cantilever Beam Filled with Electro-Rheological Fluid, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 494-502
5. BLOCK H., KELLY J.P., 1988, Electro-Rheology, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **21**, 1661-1674
6. CHANDRASHEKARA K., AGARWAL A.N., 1993, Active Vibration Control of Laminated Composite Plates Using Piezoelectric Devices: a Finite Element Approach, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 496-508
7. CHOI S.B., PARK Y.K., CHEONG C.C., 1996, Active Vibration Control of Intelligent Composite Laminate Structure Incorporating an Electro-Rheological Fluid, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 411-419
8. CHOI S.B., SPRECHER A.F., CONRAD H., 1992, Response of Electrorheological Fluid-Filled Laminate Composite to Forced Vibration, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 17-29

9. CLACK J., STANWAY R., SPROSTON J.L., 1994, The Electrical Transfer Characteristics of Electro-Rheological Fluids in the Squeeze-Flow Mode, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **5**, 713-722
10. CRAWLEY E.F., DE LUIS J., 1987, Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, **25**, 1373-1385
11. COULTER J.P., WEISS K.D., CARLSON J.D., 1993, Engineering Applications of Electrorheological Materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 248-259
12. CROSS W.B., KARIOTIS A.H., STIMLER F.J., 1970, *Nitinol Characterization Study*, Goodyear Aerospace Corporation Report, No 14188, Akron, Ohio
13. DIMITRIADIS E., FULLER C.R., ROGERS C.A., 1991, Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of thin Plates, *J. Appl. Mech.*, **113**, 100-107
14. DON D.L., COULTER J.P., 1995, An Analytical and Experimental Investigations of Electrorheological Material Based Adaptive Beam Structure, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **6**, 846-853
15. DOSCH J.J., INMAN D.J., GARCIA E., 1992, A Self Piezoelectric Actuator for Collocated Control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **3**, 1, 166-185
16. HAIQING G., KING L.M., CHER T.B., 1993, Influence of a Locally Applied Electrorheological Fluid Layer on Vibration of a Simple Cantilever Beam, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 379-384
17. HILL J.C., VAN STEENKIESTE T.H., 1991, Response Times of Electrorheological Fluids, *Journal Applied Physics*, **70**, 3, 1207-1211
18. KOROBKO E.V., MOKEEV A.A., 1991, The Electrorheological Effect in Activated Suspension, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **2**, 25-37
19. KRAWCZUK M., OSTACHOWICZ W., ŻAK A., 1997, Dynamika belki kompozytowej z włóknami nitinolu, *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej - Politechnika Śląska*, **3**, Gliwice, 111-116
20. KURNIK W., 1995, Self-Stabilization of a Composite Shaft via Thermally Adaptive Plies, *Proceedings of the First International Symposium Thermal Stresses and Related Topics*, Red. T. Noda, Hamamatsu, 541-544
21. KURNIK W., PRZYBYŁOWICZ P.M., TYLIKOWSKI A., 1995, Torsional Vibrations Actively Attenuated by Piezoelectric System, *The 4-th Polish-German Workshop Dynamical Problems in Mechanical Systems*, Red. R. Bogacz, G.P. Ostermeyer, K. Popp, IPPT PAN, Warszawa, 199-208
22. NEWMAN M.J., 1991, Distributed Active Vibration Controllers, *Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, Technomic Publishing, Lancaster-Basel, 579-592
23. OYADUI S.O., 1996, Applications of Electro-Rheological Fluids for Constrained Layer Damping Treatment of Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 541-549

24. PIETRZAKOWSKI M., 1997, Dynamic Model of Beam-Piezoelectric Actuator Coupling for Active Vibration Control, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **35**, 1, 3-20
25. PRZYBYŁOWICZ P.M., 1995, Torsional Vibration Control by Active Piezoelectric System, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **33**, 809-823
26. ROGERS C.A., LIANG C., BARKER D.K., 1989, Dynamic Control Concepts Using Shape Memory Alloy Reinforced Plates, *Proceedings of the Conference of Smart Materials, Structures and Mathematical Issues*, Red. C.A. Rogers, Technomic Publishing, Lancaster, 36-62
27. SADEGHIPOUR K., NEOGI S., SALOMON R., 1992, Development of a Novel "smart" Material Based Vibration Sensor/Damper, *Proceedings of the Conference Active Control of Noise and Vibration - APM*, DSC **38**, 223-229
28. SHIANG A.H., COULTER J.P., 1996, A Comparative Study of AC and DC Electrorheological Material Based Adaptive Structures in Small Amplitude Vibration, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 469-455
29. SHULLMAN Z.P., KOROBKO E.V., YANOVSKII Y.G., 1989, The Mechanism of the Viscoelastic Behaviour of Electrorheological Suspensions, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **33**, 181-196
30. SPANGLER R.L., 1990, Piezoelectric Actuators for Helicopter Rotor Control, *Proceedings of AIAA /ASME /AHS /ASC 31-st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Part 3, AIAA-90-1076-CP, 1589-1599
31. SUNG C.C., VARADAN V.V., BAO X.Q., VARADAN V.K., 1990, Active Control of Torsional Vibration Using Piezoceramic Sensors and Actuators, *Proceedings of AIAA /ASME /ASCE/ AHS/ASC 31-st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Part 4, AIAA-90-1130-CP, 2317-2322
32. TANI J., NAKANIWA H., OHTOMO K., 1996, Controllable Rotary Damper Using Liquid Crystal, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, AD-52, Aerospace Division*, Red. Chang, J.C.I. i inni, 621-624
33. TYLIKOWSKI A., 1993a, Dynamics of Laminated Beams with Active Fibers, *3-rd Polish-German Workshop Dynamical Problems in Mechanical Systems*, Red. B. Bogacz, K. Popp, Wierzba, IPPT PAN, Warszawa, 67-78
34. TYLIKOWSKI A., 1993b, Stabilization of Beam Parametric Vibrations, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **31**, 657-670
35. TYLIKOWSKI A., 1995, Active Stabilization of Beam Vibrations Parametrically Excited by Wide-Band Gaussian Force, *Proceedings of the 1995 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, Red. S. Sommerfeld, H. Hamada, Newport Beach, CA, 91-102
36. TYLIKOWSKI A., 1996, Active Control of Mechanical Distributed Systems with Stochastic Parametric Excitations, *Modelling and Optimization of Distributed Parameter Systems - Application to Engineering*, Red. K. Malanowski, Z. Nahorski, M. Peszyńska, Chapman and Hall, London, 287-294
37. TYLIKOWSKI A., 1997a, Active Flutter Suppression of a Panel Using a Distributed Control, *Proceeding of The Second Scientific Conference on Smart Mechanical Systems - Adaptronics*, Magdeburg, 227-236

38. TYLIKOWSKI A., 1997b, Stability Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composite rotating Shaft, *Proceedings of the 16-th Canadian Congress of Applied Mechanics*, Laval University Quebec, 95-96
39. WEISS K.D., CARLSON J.D., COULTER J.P., 1993, Material Aspects of Electrorheological Systems, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**, 13-34
40. WU W., GORDENINEJAD F., WIRTZ R.A., 1996, Modeling and Analysis of a Shape Memory Alloy-Elastomer Composite Actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **7**, 441-447
41. WINSLOW W.M., 1949, Induced Fibrillation of Suspensions, *Journal of Applied Physics*, **20**, 1137-1140