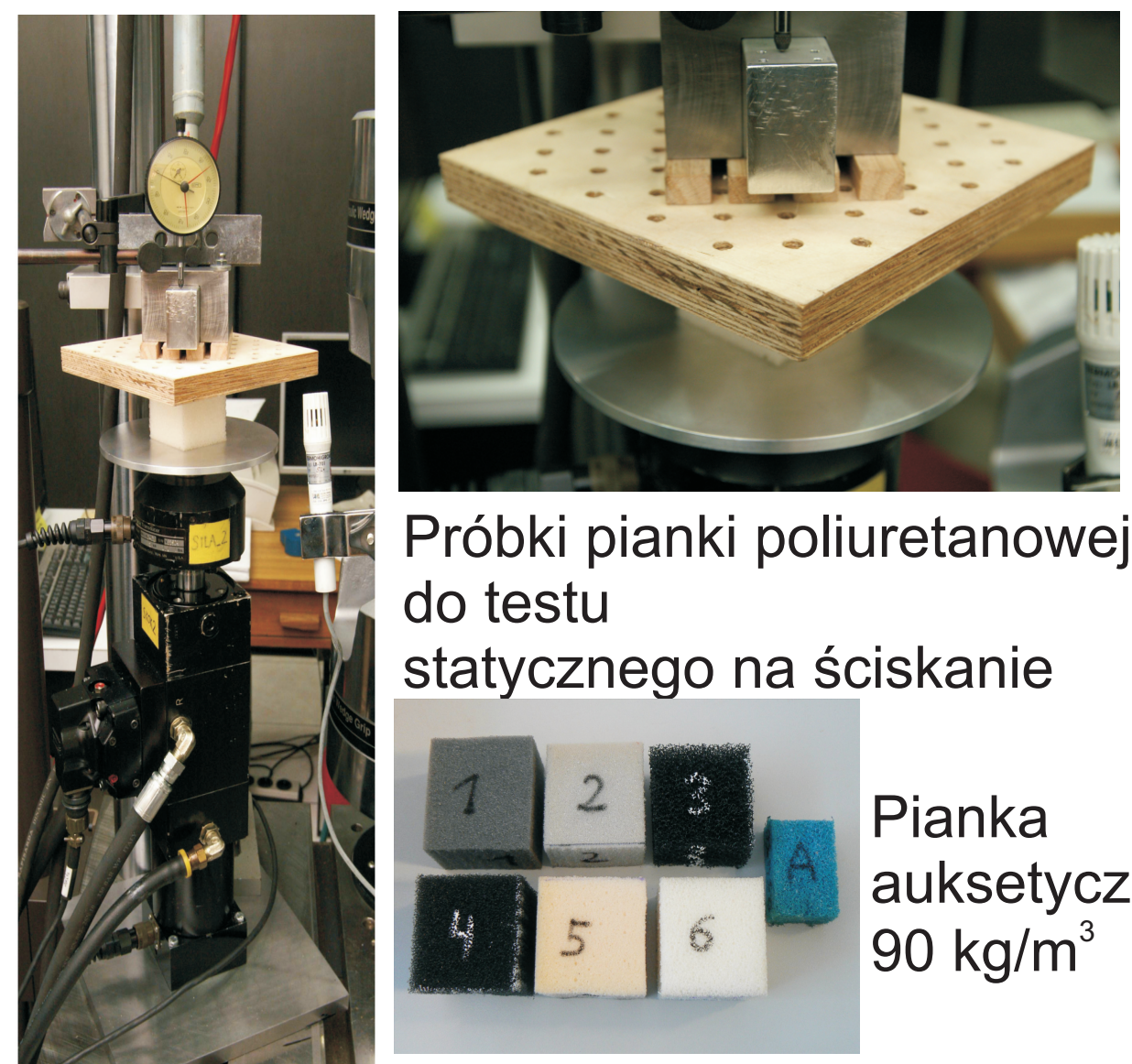


Materiały inteligentne - oraz bazujące na nich systemy zespolone (ang. smart embedded systems) do zastosowania w lotnictwie

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska

Wyniki badań

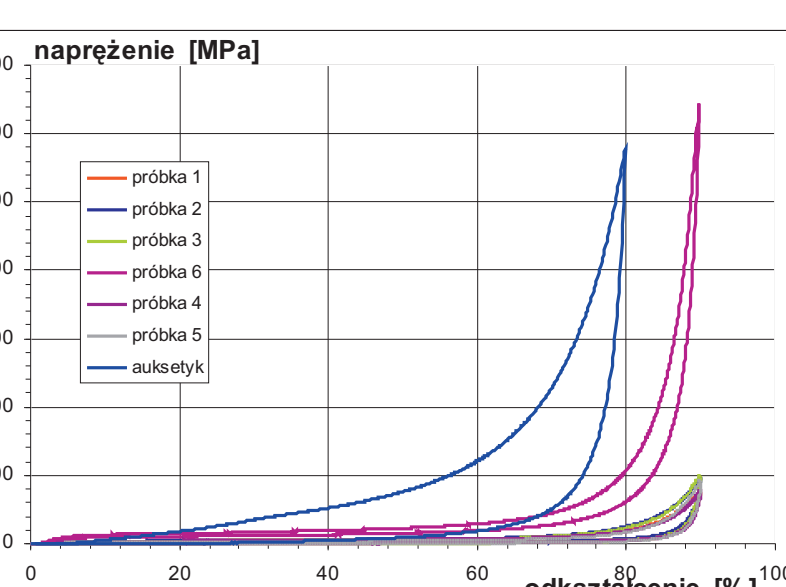
Stanowisko badawcze do testu ściskania



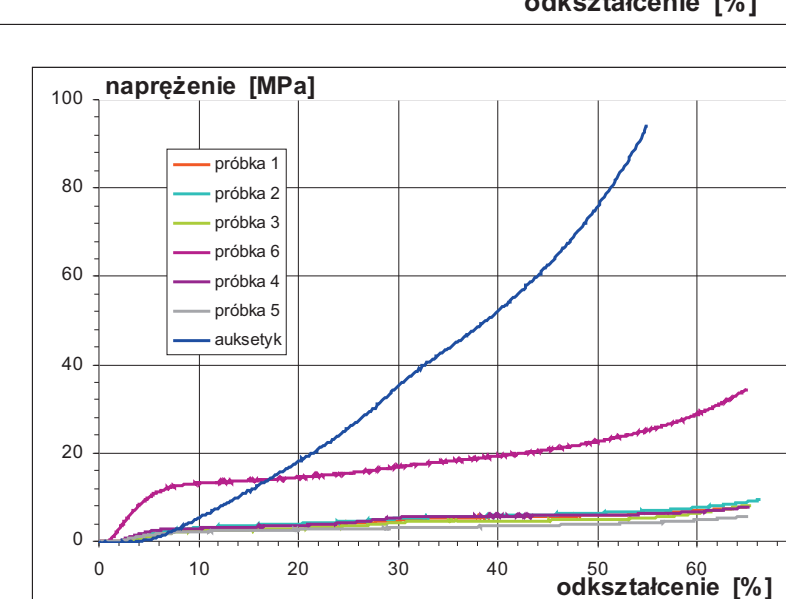
Próbki pianki poliuretanowej do testu statycznego na ściskanie

Pianka auksetyczna 90 kg/m³

gęstość pianek:
1 - 33; 2 - 40; 3 - 24; 4 - 27; 5 - 52; 6 - 90 kg/m³



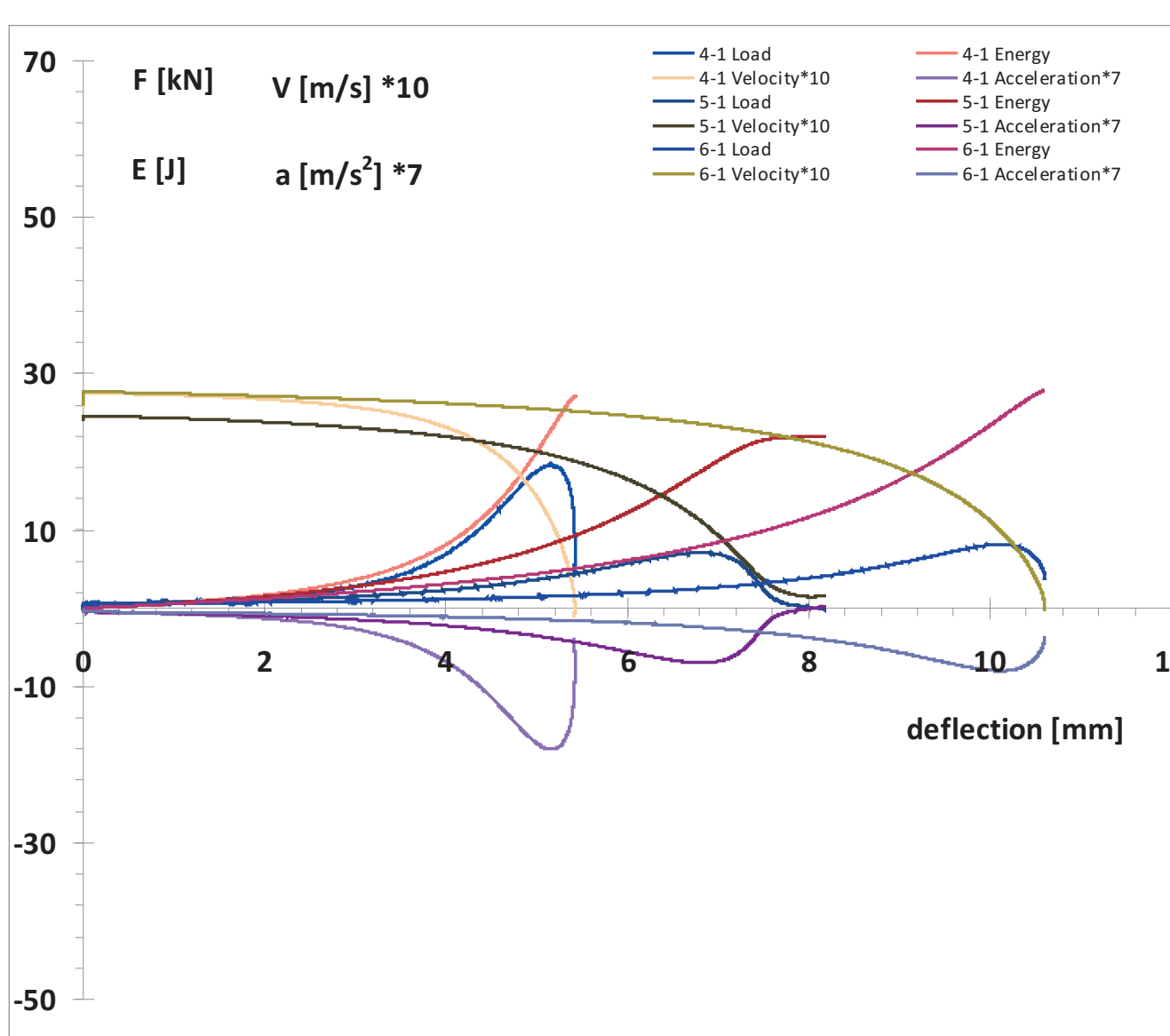
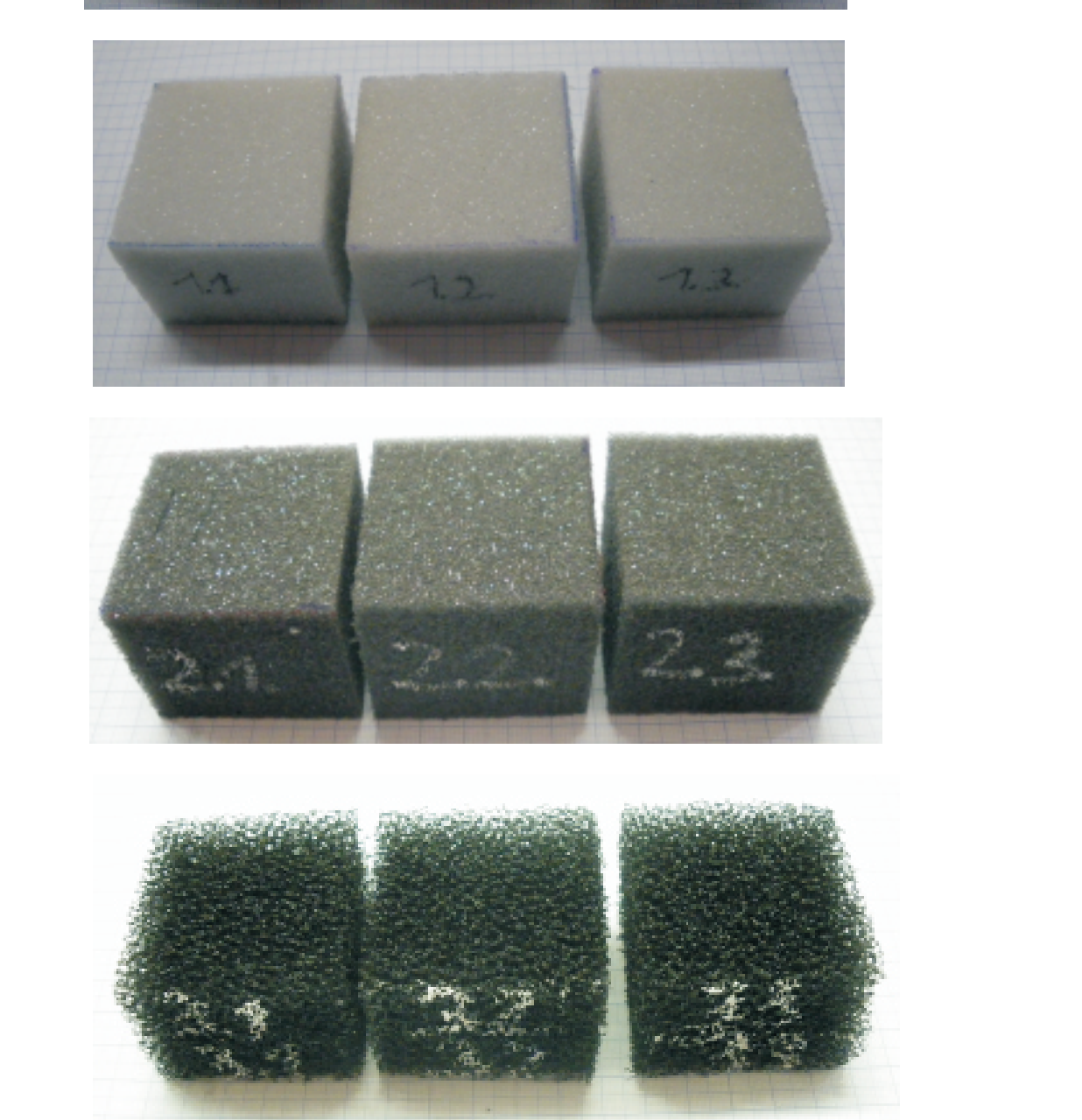
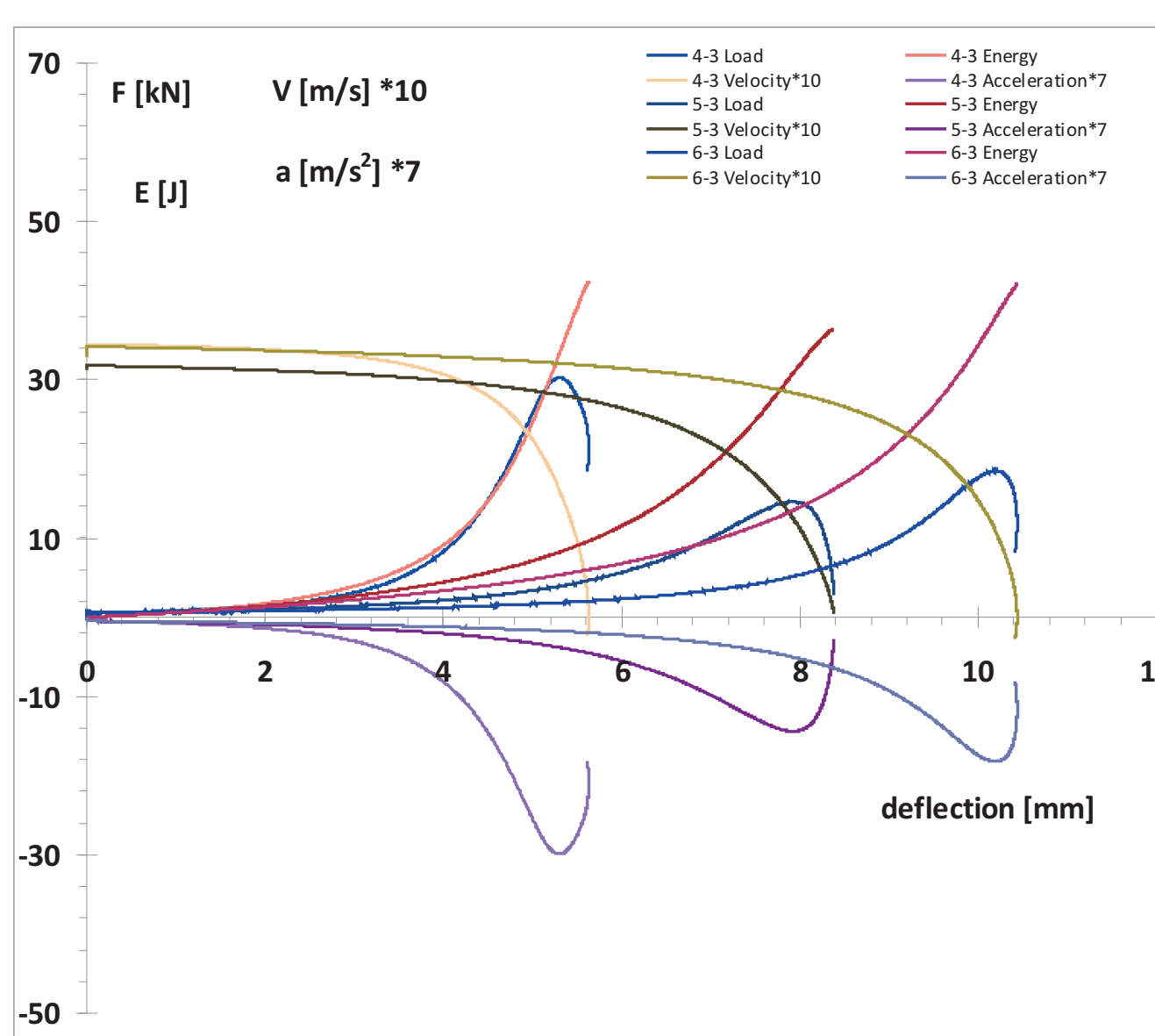
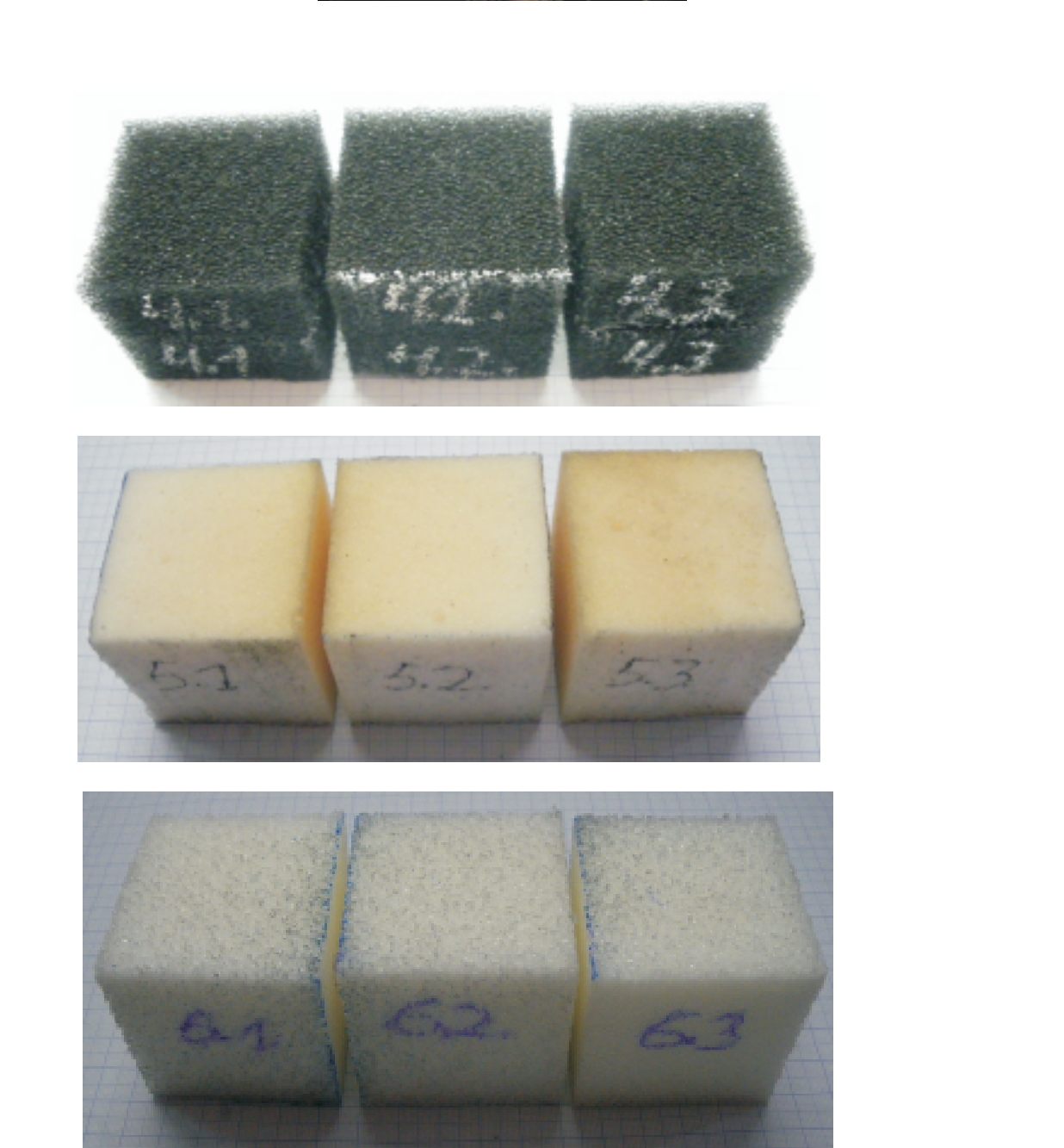
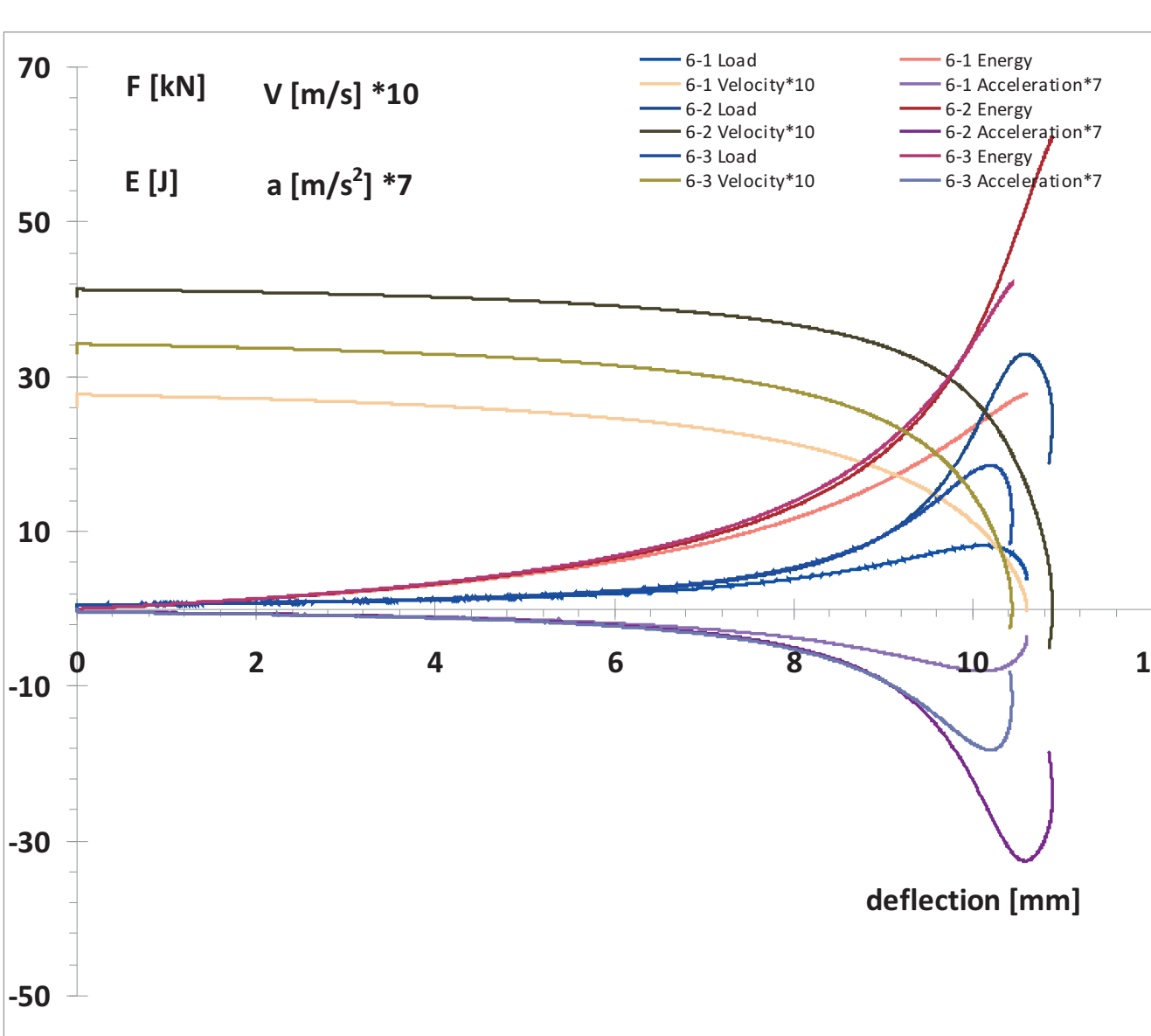
Rys. 1. Pianki - charakterystyka ściskania



Rys. 2. Pianki - charakterystyka ściskania w początkowym zakresie

Badanie dynamicznych właściwości tłumiących wybranych pianek poliuretanowych o różnej gęstości

Stanowisko badawcze do testu (ITS Warszawa)



Rys. 3. Charakterystyki tłumienia pianek

Próbki pianki poliuretanowej do testu dynamicznych właściwości tłumiących

Wnioski

1. Zakupiono techniczne pianki poliuretanowe o różnych właściwościach fizykochemicznych.
2. Opracowano założenia do technologii pianki auksetycznej na bazie dostępnych materiałów wyjściowych.
3. Wykonano modernizację stanowiska i opracowano metodykę badania pianek auksetycznych
4. Przeprowadzono badania doświadczalne pianek- uzyskano charakterystyki ściskania. Pianka auksetyczna o gęstości równej gęstości pianki poliuretanowej charakteryzowała się 3 razy większym naprężeniem przy tym samym odkształceniu.
5. Dodatkowo wykonano badania dynamiczne właściwości tłumiących wybranych pianek poliuretanowych o różnych gęstościach.

Przykłady zastosowania w lotnictwie

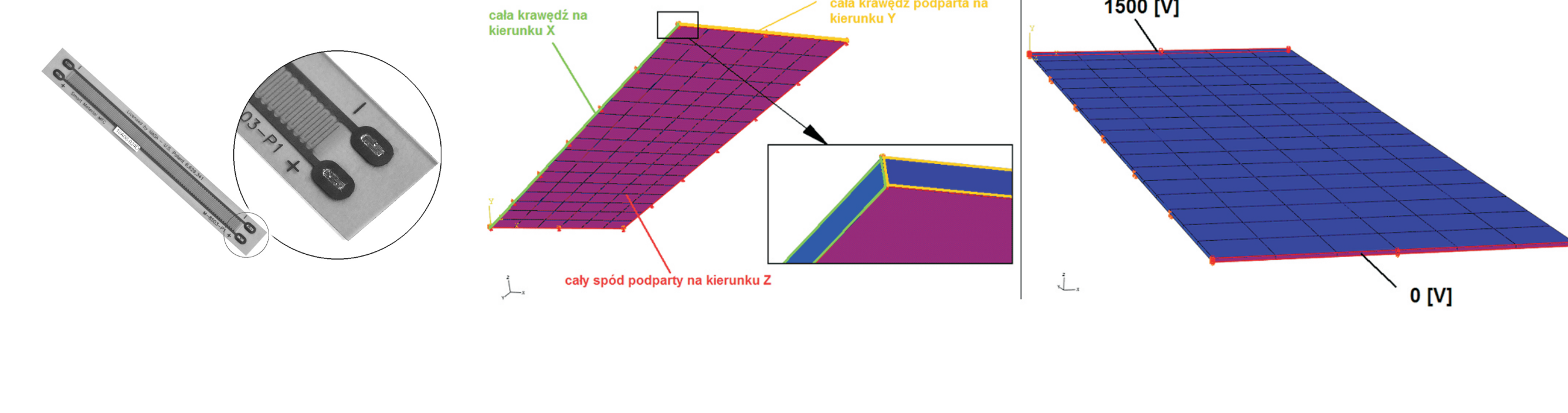


Widok fragmentu fotela (siedzisko i oparcie) śmigłowca Mi-8

Wyniki badań

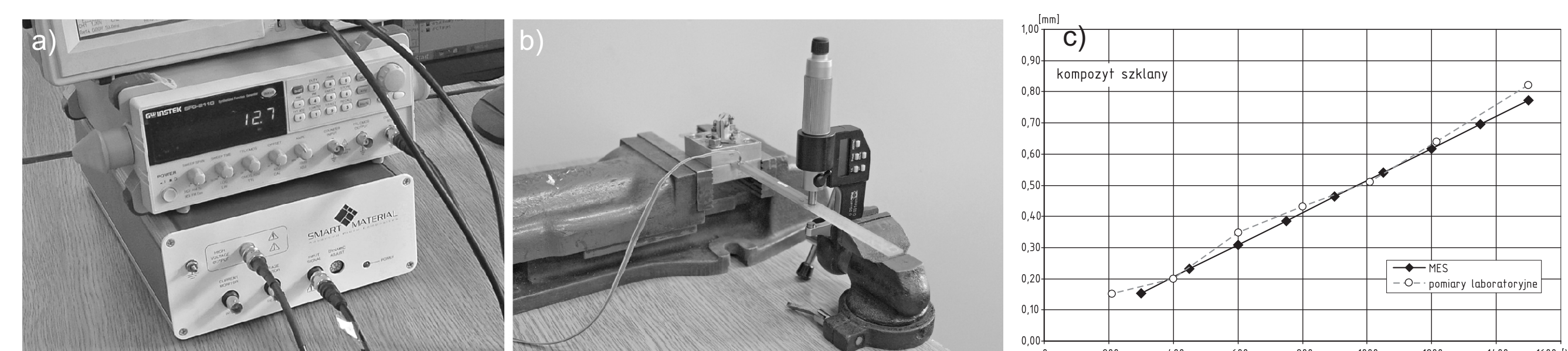
W okresie sprawozdawczym opracowano zagadnienie interakcyjnego wyoboczenia konstrukcji cienkościennych obciążonych impulsem ściskającym. Wyjaśniono zjawiska związane z dynamicznym wyoboczeniem. Sformułowano podstawowe równania metody analityczno-numerycznej oraz sposób rozwiązania problemu dynamicznego wyoboczenia z zastosowaniem MAN i MES. Przedstawiono kryteria dynamiczne zastosowane do wyznaczenia krytycznej wartości współczynnika obciążenia DLF. Wyniki obliczeń dla konstrukcji cienkościennych z żebrami pośrednimi poddanych impulsowemu ściskaniu opracowano postaci monografii (Teter, 2010).

Przygotowano model numeryczny (ABAQUS) belki laminatowej z naklejonym elementem aktywnym M-8503-P1 (Smart Material Corp., USA), wykorzystującym efekt piezoelektryczny d₃₃. Wyznaczono ugięcia statyczne układu dla różnych wartości napięcia zasilającego. Rezultaty symulacji numerycznych porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym. Rozważany przetwornik zamodelowano w systemie ABAQUS za pomocą objętościowych elementów brylowych C3D20E, posiadających w każdym węźle dodatkowy stopień swobody, związany z właściwościami piezoelektrycznymi materiału. Model MES układu składał się 317 elementów (belka 300, piezoelektryk 17) i 1243 węzłów, a rozmiar zadania obliczeniowego wynosił 7034 stopnie swobody. W wyniku badania zachowania elementu piezoelektrycznego w dwóch stanach obciążenia omówionych w jego dokumentacji technicznej (odkształcenia elementu swobodnego, rys. 1 oraz siła reakcji układu) ustalono, że koniecznym jest skorygowanie wartości współczynnika d₃₃ podawanej przez producenta.



Rys. 1. Analiza numeryczna zachowania piezoelektrycznego elementu aktywnego

W drugim etapie badań przeanalizowano zachowanie jednostronnie utwardzonej belki kompozytowej o sekwencji warstw 0/90/+45/-45/+45/90/0, wykonanej z jednokierunkowego preimpregnatu szklano-epoksydowego (żywica Sicomin 8100 + utwardzacz 8824, udział włókien 50±2%). Przetwornik piezoelektryczny naklejono bezpośrednio przy utwardzonej krawędzi belki (rys. 2).



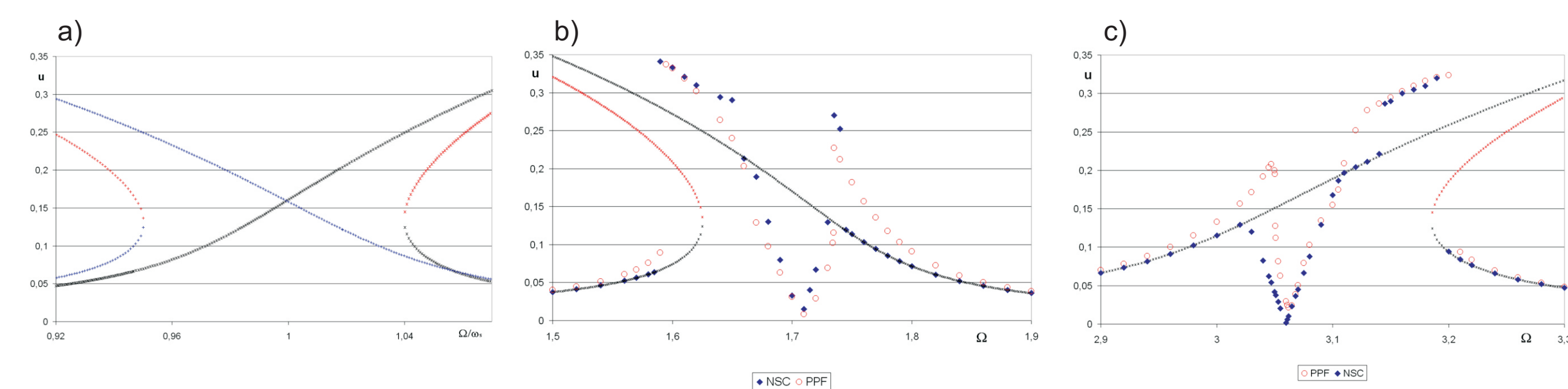
Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne (a, b) oraz porównanie wyników badań doświadczalnych i analiz numerycznych (c)

W oparciu o pomiary na stanowisku laboratoryjnym zweryfikowano wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych w systemie ABAQUS. Na rys. 2c przedstawiono porównanie rezultatów symulacji numerycznych i wyników pomiarów stanowiskowych przemieszczeń punktu znajdującego się na krawędzi elementu aktywnego. Wartości przemieszczeń wyznaczono dla kilku wartości napięcia zasilającego przetwornik piezoelektryczny.

Ponadto dokonano porównania działania kontrolerów PPF i NSC w zależności od znaku nieliniowości geometrycznej opisującej dynamikę belki. W tym celu dla obydwu rozważanych przypadków dobrano amplitudę wymuszenia zapewniającą zbliżony poziom odpowiedzi dynamicznej układu (rys. 3a). Odpowiedzi układów z miękką i twardą nieliniowością geometryczną zaprezentowano na rysunkach 3b i 3c. Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie się układów przy częstotliwości wymuszenia spoza zakresu, dla którego dostrojone zostały kontrolery.

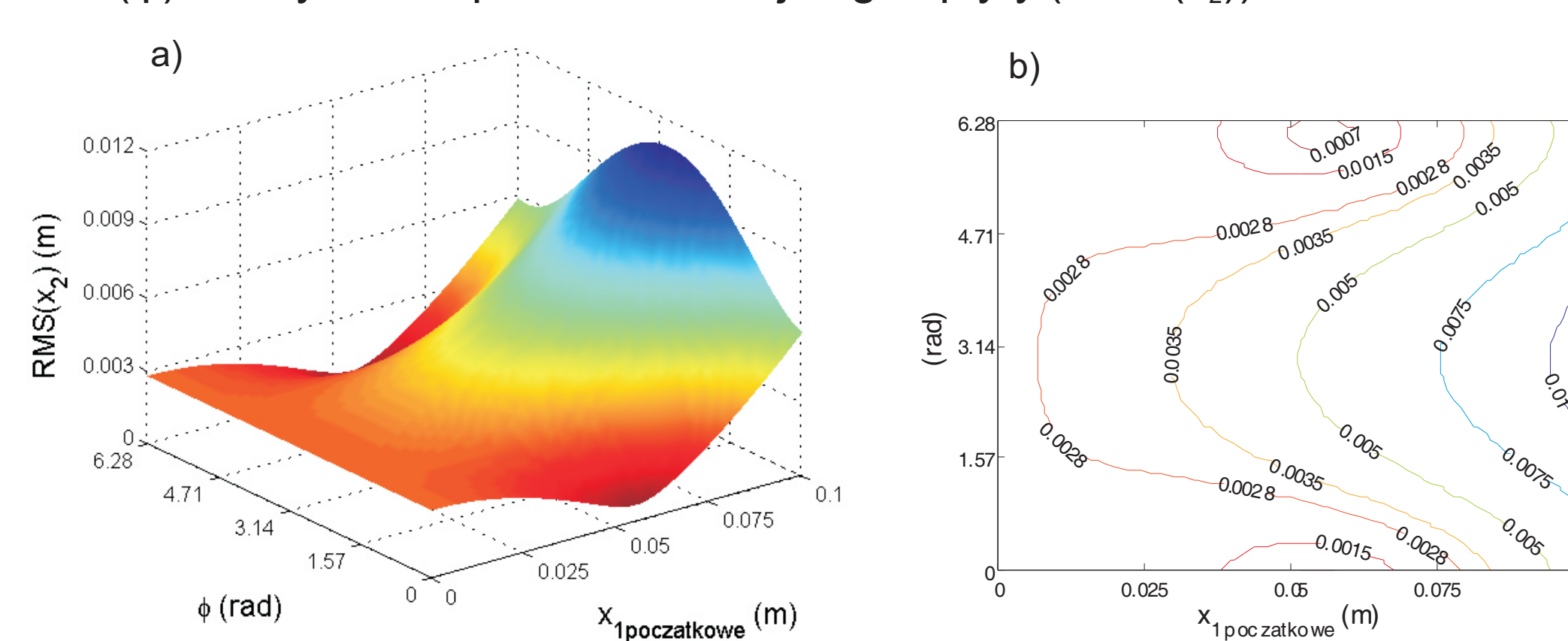
Opracowano także i uruchomiono model do identyfikacji częstotliwości własnej belki z wykorzystaniem adaptacyjnej metody MRAS z algorytmem minimalizacji energetycznego funkcjonału Lapunowa oraz modele z regulatorem liniowo-kwadratowym LQ; poczyniono przygotowania do rozszerzenia regulatora o algorytm adaptacyjny. Wykonano i uruchomiono laboratoryjny układ DSP do zarządzania i sterowania zadaniami stanowiska badawczego, na które składają się:

- zarządzanie systemem pomiarowym,
- komunikacja z otoczeniem,
- realizacja algorytmów regulacji,
- przetwarzanie danych.



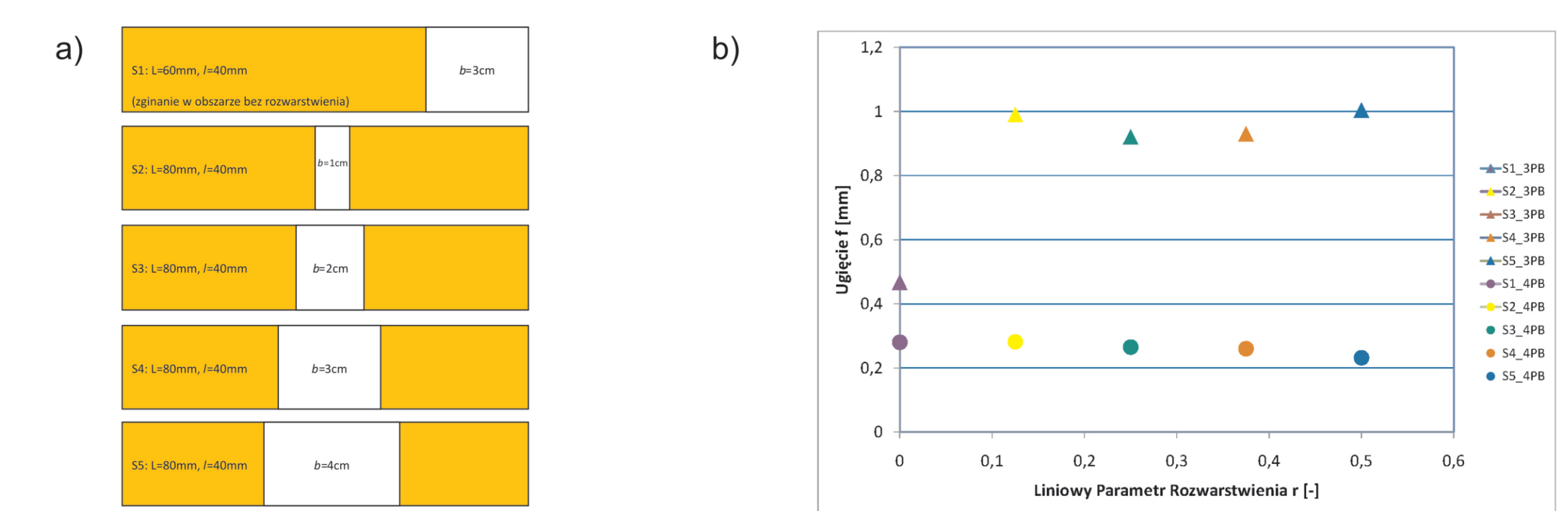
Rys. 3. Porównanie odpowiedzi belek z miękką i twardą nieliniowością geometryczną dla kontrolerów NSC i PPF

Kolejnym rodzajem przeprowadzonych badań były badania modelu numerycznego płyty kompozytowej (rys. 4). Określono wpływ warunku początkowego kontrolera NSC (X₁początkowe) i fazy wymuszenia (φ) na szybkość i poziom redukcji drgań płyty (RMS(x₂)).



Rys. 4. Charakterystyka 3D (a) oraz wykres izololinii (b) wskaźnika jakości minimalizacji drgań

Przeprowadzono także wstępne badania wytrzymałościowe belek laminatowych ze sztucznym rozwarstwieniem (delaminacją), w celu wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych. Badania prowadzono na próbkach w postaci belek o długości 120mm i szerokości około 25mm. Przeprowadzono próby zginania trójpunktowego i czteropunktowego belek wykonanych z laminatu szklano-epoksydowego (rys. 5a) o sekwencji [+45/-45/+45/-45/0°]s (10 warstw), wykonanego w technologii preimpregnatowej ("prepreg"). Grubość pojedynczej warstwy prepregu wynosiła 0,255mm.



Rys. 5. Belki laminatowe szklano-epoksydowe o różnej wielkości rozwarstwienia (a) oraz zależność ugięcia belek od wielkości delaminacji (b)

Badania przeprowadzono na zrywaku Zwick Z100 (sterowanej komputerem), wyposażonej w głowicę pomiaru siły o zakresie 2500N. Rozstaw dolnych wałków urządzenia zginającego wynosił L=80mm, a górnych wałków (w próbie czteropunktowego zginania) l=40mm, dzięki czemu unikano wywierania nacisku bezpośrednio na obszar z istniejącą sztuczną delaminacją. Prędkość ruchu trawersy zrywarki nie przekraczała 5mm/min – badanie quasi-statyczne. Jak pokazuje wykres na rys. 5b, wstępne badania doświadczalne wykazały wpływ wielkości rozwarstwienia na sztywność belek laminatowych przy zginaniu.

Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym

Regularnie odbywają się spotkania robocze z pracownikami PZL Świdnik S.A. w celu uzgodnienia kierunków badań. Współpraca dotyczy technologii wytwarzania kompozytowych struktur lotniczych – zorganizowano m.in. długoterminowe staże przemysłowe, wykonano wstępną partię szerokiej gamy próbek kompozytowych do dalszych badań oraz konstrukcji śmigłowca – prowadzone są intensywne prace nad zastosowaniem aktywnego trymera do modelu łopaty wirnika nośnego.

Wnioski

We wszystkich rozważanych przypadkach obciążenia konstrukcji cienkościennych impulsem ściskającym, gdy czas trwania impulsu jest równy okresowi drgań własnych otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników dla wszystkich hipotez. Dla impulsu trwającego połowę okresu drgań własnych dobrą zgodność uzyskano tylko dla kryteriów: Budiansky'ego-Hutchinsona oraz portretów fazowych. Stwierdzono, że zastosowanie kryteriów bazujących tylko na przemieszczeniach może być niewystarczające i subiektywne. Zastosowanie opisu dwuparametrowego: przemieszczenie i prędkość jest bardziej miarodajne. Zmodyfikowane kryteria bazujące na kryterium Kleiber-Kotula-Saran dają zaniżone wyniki i nie mogą być stosowane we wszystkich przypadkach. W przypadku obciążenia statycznych jak i dynamicznych interakcja postaci globalnej i lokalnych odpowiadających drugiemu minimum jest bardziej niebezpieczna. W odróżnieniu od obciążenia statycznych w przypadku obciążenia dynamicznego obecność żeber o małej sztywności powoduje oczekiwane zwiększenie odporności na wyoboczenie.

W badaniach dotyczących kontrolerów NSC i PPF wykazano istotny wpływ znaku nieliniowości geometrycznej na dynamikę układu drgającego belka-piezoelektryk, jak i samego kontrolera. Stwierdzono lepszą skuteczność działania kontrolera nasyconego (NSC) w układach o nieliniowości twardej oraz kontrolera PPF w układach o nieliniowości miękkiej. Przeprowadzone analizy posłużyły do sporządzenia wytycznych do doboru algorytmów adaptacyjnych mających na celu zmniejszenie wpływu zmiany częstotliwości wymuszenia na spadek skuteczności działania algorytmów NSC i PPF.

W obrębie metod adaptacyjnych, stosując algorytm identyfikacji oparty o metodę minimalizacji funkcjonału Lapunowa uzyskano lepszą dokładność dotwarzania niż przy funkcjonał Model Identification Techniques. Odtwarzanie częstotliwości własnej możliwe jest zarówno podczas badania odpowiedzi na skok jednostkowy oraz przy wymuszeniu harmonicznym. Zasadnicza różnica w stosowanym algorytmie polega na konieczności uwzględnienia czasu trwania próby identyfikacji przy wymuszeniu częstotliwościowym.

Wprowadzenie parametru rozwarstwienia r=bL pozwoliło określić wpływ wielkości delaminacji na charakterystyki sztywnościowe elementów kompozytowych.

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Bochenki M., Warmiński J., Jarzyna W., Filippek P., Augustyniak M.: *PPF of versus saturation control for a strongly nonlinear beam structure*. 10th Conference on Dynamical Systems – Theory and Applications, Łódź, Poland, 7 – 10 December 2009.
- Wojciech Jarzyna, Michał Augustyniak, Jerzy Warmiński, Marcin Bochenki: *Model based identification of active beam composite structure - application mras algorithm*. Proceedings of the 3rd International Conference on Nonlinear Dynamic ND-KhPI2010 September 21-24, 2010, Kharkov, Ukraine
- Mitura A., Kaźmir T., Warmiński J., Augustyniak M.: *Elimination of vibration of composite plate with active elements of MFC type*. XVIII French-Polish Seminar of Mechanics, Warsaw, Poland, 31 Mai 2010.
- Warmiński J., Bochenki M., Jarzyna W., Filippek P., Augustyniak M.: *Active Suppression of Nonlinear Oscillations by Application PPF And Saturation Controllers: Analytical Investigation And Experimental Verification*, in IUTAM Symposium on Nonlinear Dynamics for Advanced Technologies and Engineering Design, NDATED, Aberdeen, UK, 27-30 July, 2010.

Publikacje

- Lisiecki J., Błażejewicz T., Kłysz S.: *Elastyczne pianki auksetyczne-wytwarzanie, właściwości potencjalne zastosowania*. Prace Naukowe ITWL, nr 27, str. 37-55
- Filipek P., Augustyniak M., Bochenki M.: *Control of Active Piezoelectric Beam System, Applying DSP-Based Controller*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 7/2010
- Jarzyna W., Augustyniak M., Bochenki M.: *Aktywne struktury piezoelektryczne w układach regulacji*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 4/2010
- Jarzyna W., Augustyniak M., Warmiński J., Bochenki M.: *Characteristics and Implementation of Piezoelectric Structures in Active Composite Systems*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 7/2010
- Latański J., Dębski H.: *Modelowanie w systemie ABAQUS konstrukcji kompozytowych z piezoelektrycznymi elementami aktywnymi*. (wysłane do czasopisma Kompozyty)
- Mitura A., Kaźmir T., Warmiński J., Augustyniak M., Jarzyna W.: *Vibration Suppression of Composite Plate with MFC Active Elements*, Machine Dynamics Problems, wysłane do recenzji
- Samborski S., Sadowski T.: *Dynamic Fracture Toughness of Porous Ceramics*, Journal of the American Ceramic Society, 93 [11], 3607-3609 (2010)
- Teter A.: *Wielomodalne wyoboczenie cienkościennych uźebrowanych słupów obciążonych impulsem ściskającym*. Zeszyty Naukowe Politechniki nr 1063. Rozprawy Naukowe, z. 390, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010, (monografia, 198 s.
- Teter A.: *Dynamic critical load based on different stability criteria for coupled buckling of columns with stiffened open cross-sections*. Thin-Walled Structures, 2010/11, http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2010.09.018.
- Warmiński, J.: *Nonlinear Normal Modes of a Self-Excited System Driven by Parametric and External Excitations*, Nonlinear Dynamics, 2010, 61, 677-689.

Prace mgr, dr, hab.

Prace magisterskie obronione:

- Kamil Wośko: *Liniowo-kwadratowa regulacja w układach mechatronicznych*. Promotor: dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
- Michałina Szymanek: *Badania eksperymentalne drgań własnych warstwowych płyt kompozytowych*. Promotor: dr inż. Jarosław Latański
- Zofia Szmít: *Analiza drgań własnych płyt cienkich – metoda eksperymentalna i analiza numeryczna MES*. Promotor: dr inż. Jarosław Latański

Prace habilitacyjne

Tytuł: *Wielomodalne wyoboczenie cienkościennych uźebrowanych słupów obciążonych impulsem ściskającym*
Autor: Andrzej Teter
Status: *Praca po obronie*