

WPŁYW WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA SPRĘŻYSTOŚCI WZDŁUŻNEJ KLEJU NA UDARNOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLOKOWYCH

Influence of Young's adhesive modulus on impact strength of block adhesive joints

Andrzej KOMOREK, Jan GODZIMIRSKI, Marek ROŚKOWICZ, Jarosław GAŚSIOR

Streszczenie: Opisane w artykule badania stanowią część poszukiwań autorów, zmierzających do określenia zależności pomiędzy określonymi właściwościami klejów a udarnością wykonanych z ich użyciem połączeń.

Kleje konstrukcyjne (jako materiały polimerowe) charakteryzują się różnymi wartościami modułów Younga, wynoszącymi od kilku do prawie 10 000 MPa w temperaturze pokojowej. Wstępne badania wskazują, że powinna istnieć zależność pomiędzy modułem Younga klejów a wytrzymałością udarową wykonanych nimi połączeń. Hipotezę tę zweryfikowano przeprowadzając badania eksperymentalnie i numeryczne połączeń wykonanych klejami o znacznie różniących się wartościach modułów Younga.

W celu realizacji badań doświadczalnych przygotowano próbki, w których elementy ze stali S235 łączono klejami epoksydowymi: Epidian 57/Z1 oraz Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 i EA 9455.

Testy połączeń klejowych przeprowadzono za pomocą młota wahadłowego, dedykowanego do badań połączeń klejowych. Maksymalna energia wahadła stosowanego w badaniach wynosiła 15 J. Do określenia udarności badanych połączeń wykorzystano zależność według której, energia zużyta do oderwania górnego elementu próbki w takim teście, czyli energia wytracona przez wahadło, jest miarą wytrzymałości udarowej połączenia klejowego.

Modele do obliczeń numerycznych opracowano na podstawie próbek stosowanych w badaniach eksperymentalnych. Przygotowane modele z uwzględnieniem warunków początkowych i brzegowych zostały poddane dynamicznym obliczeniom numerycznym metodą elementów skończonych z wykorzystaniem modułu Explicit Dynamics programu ANSYS.

Rezultaty badań eksperymentalnych i numerycznych wyraźnie wskazują na zależność udarności połączeń klejowych blokowych od modułu Younga zastosowanego kleju. Najwyższą udarnością spośród badanych cechują się połączenia wykonane klejami o najniższych modułach Younga.

Słowa kluczowe: połączenie klejowe, udarność, młot wahadłowy, obliczenia numeryczne

Abstract: The research described in this article is part of the authors' search to determine the relationship between specific properties of adhesives and the impact strength of their joints.

At impact loads, there may be a relationship between the adhesive Young's modulus and the impact strength of the joints made using the adhesive. This hypothesis was verified by conducting experimental and numerical tests of joints made with adhesives of significantly different Young's modulus values.

In order to carry out the experimental tests, samples were prepared with the S235 steel adherends which were joined with epoxy adhesives: Epidian 57/Z1 and Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 and EA 9455.

The tests were carried out using a pendulum hammer dedicated to testing adhesive joints. The maximum energy of the pendulum used in the tests was 15 J. To determine the impact strength of the tested joints, was used the dependence according to which the energy used to detach the upper element of the sample in such a test, i.e. the energy lost by the pendulum, is a measure of the impact strength of the adhesive joint.

Models for numerical calculations were developed on the basis of samples used in experimental tests. The prepared models, taking into account the initial and boundary conditions, were subjected to dynamic numerical calculations using the finite element method using the Explicit Dynamics module of the ANSYS program.

The results of experimental and numerical tests clearly indicate the dependence of the impact strength of the block adhesive joints on the Young's modulus of the applied adhesive. The highest impact strength among the tested joints are joints made with the lowest Young's modulus adhesive.

Keywords: adhesive joint, impact strength, pendulum hammer, numerical calculations

Wprowadzenie

Producenci środków transportu, poszukując możliwości zmniejszenia masy całkowitej swoich konstrukcji, zastępują połączenia mechaniczne połączeniami klejowymi, ponieważ w połączeniach mechanicznych masa elementów łączących jest nawet kilka razy większa niż masa kleju tworzącego takie same połączenia. Jednak aby poprawnie projektować i stosować połączenia klejowe, należy znać ich właściwości. Jednym z istotnych parametrów wytrzymałościowych połączeń klejowych, stosowanych do łączenia elementów w konstrukcjach, jest odporność na działanie obciążeń dynamicznych, która może mieć związek z modułem Younga

kleju zastosowanego do wykonania połączenia. W opisanych w artykule badaniach autorzy poszukują zależności jakościowej pomiędzy modułem Younga kleju a udarnością wykonanego nim połączenia. Autorzy podjęli również próbę oszacowania związku pomiędzy udarnością kleju a udarnością wykonanego nim połączenia.

W testach połączeń klejowych stosowano metodykę badania udarności z wykorzystaniem próbek blokowych, w których spoina klejowa jest niszczona poprzez udarowe obciążenia ścinające. Używając tej technologii, energię traconą podczas niszczenia próbki – czyli wytrzymałość udarową połączenia [6] można wyznaczyć na podstawie różnicy wysokości wahadła przed i po uderzeniu.

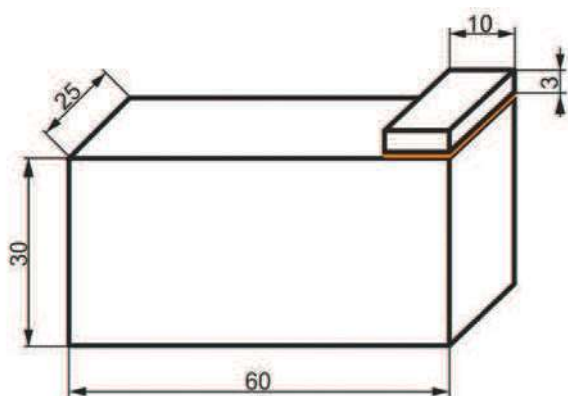
W badaniach analizowano wyniki badań udarności połączeń wykonanych klejami: Epidian 57/Z1 oraz Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 i EA 9455.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzono obliczenia numeryczne badanych przypadków w programie ANSYS, analizując rozkłady i przebieg w czasie naprężeń maksymalnych głównych w spoinach.

W celu wyznaczenia udarności klejów, wykonano odlewane próbki, które poddano badaniom udarności metodą Charpy'ego.

Metodyka i wyniki badań eksperymentalnych

W celu przeprowadzenia badań udarowych połączeń klejowych przygotowano próbki blokowe (rys. 1), których elementy wykonano ze stali zwykłej jakości S235.



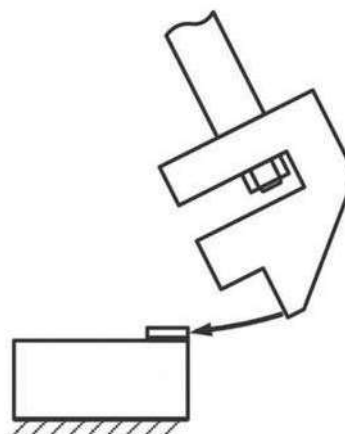
Rys. 1. Próbkę stosowana w badaniach udarności
Fig. 1. The sample used in impact strength tests

Jako kleje zastosowano tworzywa adhezyjne o istotnej różnicy modułu Younga, wymienione w tabeli (tab. 1). Do badań przygotowano 10 serii próbek.

Elementy metalowe przed klejeniem oczyszczono oraz nadano ich powierzchniom odpowiednią strukturę i chropowatość metodą obróbki strumieniowo-ściernej, stosując jako medium ściernie żużel pomiedziowy. Następnie powierzchnie próbek przemyto benzyną ekstrakcyjną i umieszczono w komorze suszarki laboratoryjnej celem odparowania benzyny. Tak przygotowane elementy jak najszybciej klejono, aby uniknąć przypadkowego zabrudzenia powierzchni klejonych bądź osadzenia się kurzu, tlenków lub wilgoci. Podczas składania elementów do klejenia, zwracano uwagę na właściwe położenie elementów względem siebie, gdyż nawet niewielkie nieprawidłowości geometrii próbek skutkują istotnymi zmianami charakteru obciążenia i w efekcie – uzyskiwanych wyników [1, 2, 3, 5]. Sklejone serie próbek umieszczano na płycie podstawy i dociskano ciśnieniem 40 kPa na czas utwardzania, którego długość złożono na 7 dób w temperaturze otoczenia (21°C). Po utwardzeniu spoin, przeprowadzono ocenę jakości uzyskanych połączeń oraz usunięto wypływkę kleju.

Tabela 1. Moduły Younga klejów stosowanych w badaniach
Table. 1. Young's modulus of adhesives using in tests

Lp.	Nazwa kleju	Moduł Younga E [MPa]
1.	Epidian 57/Z1	1800
2.	Loctite EA 9455	60
3.	Loctite EA 9450	1025
4.	Loctite EA 9480	4400
5.	Loctite EA 9492	6700



Rys. 2. Schemat przyłożenia obciążenia do próbki
Fig. 2. Scheme of the block impact test

Badania przeprowadzono na dedykowanej maszynie do badania udarności połączeń klejowych blokowych i zakładkowych. Maksymalna energia stosowanego w badaniach wahadła wynosiła 15 J, a prędkość w najniższym położeniu – 2,96 m/s. Badania prowadzono przykładając obciążenie udarowe wg schematu przedstawionego na rys. 2 [4]. W czasie badań zwracano szczególną uwagę na utrzymywanie stałej odległości impaktora od spoiny klejowej, ze względu na istotny wpływ tego parametru na uzyskiwane wyniki.

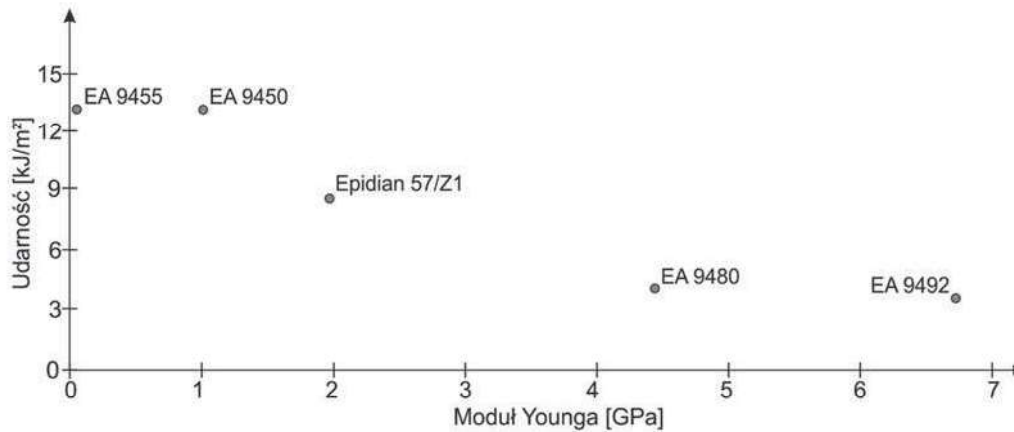
Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 3.

Uzyskane wyniki (rys. 3) wyraźnie wskazują na zależność udarności połączeń klejowych blokowych od modułu Younga zastosowanego kleju. Najwyższą udarnością cechują się połączenia wykonane klejami o najniższym module Younga. Wydaje się, że takie zjawisko jest związane z kruchością i niewielkim odkształceniem niszczącym klejów o wysokiej sztywności.

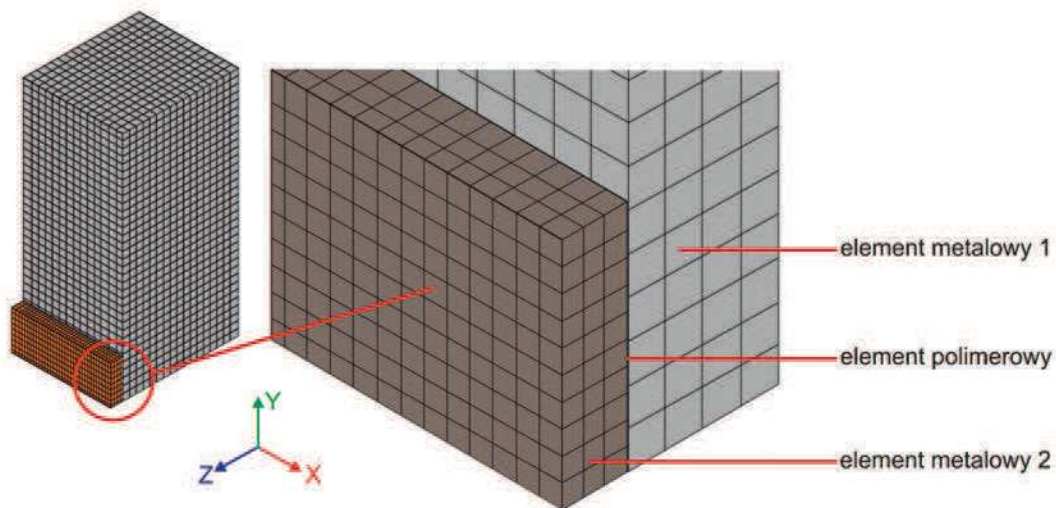
Analizy numeryczne

Obliczenia prowadzono w programie Ansys z wykorzystaniem modułu Explicit Dynamics.

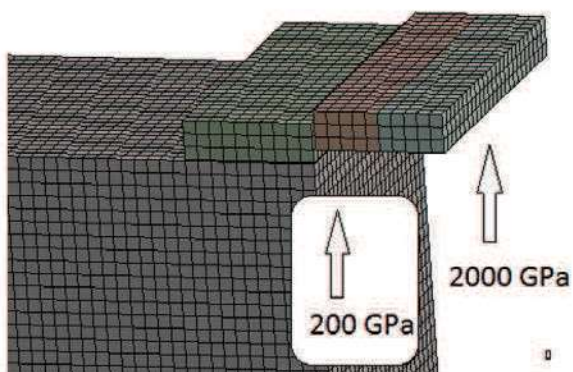
Zbudowany model numeryczny próbki (rys. 4) został obciążony dynamicznie modelem prostopadłościennego impaktora o wymiarach 5×25×3 mm, któremu



Rys. 3. Zależność udarności blokowych próbek stalowych od modułu Younga klejów
 Fig. 3 The dependence of impact strength of block steel samples on the adhesives Young's modulus



Rys. 4. Model 3D próbki z przyklejonym prostokątnym elementem
 Fig. 4. 3D model of the sample with a bonded cuboid element

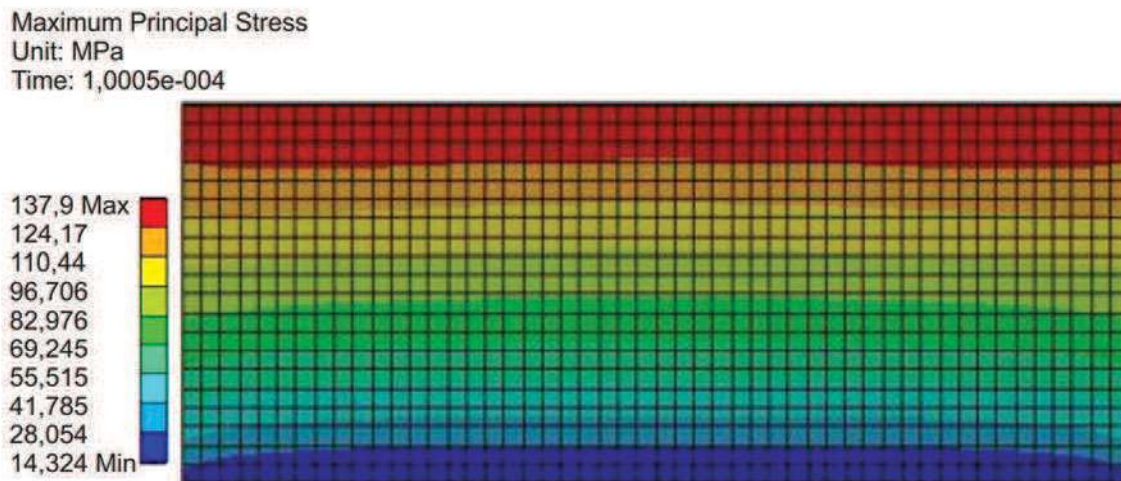


Rys. 5. Model impaktora składającego się z dwóch części o różnej sztywności
 Fig. 5. The impactor model consisting of two parts of varying stiffness

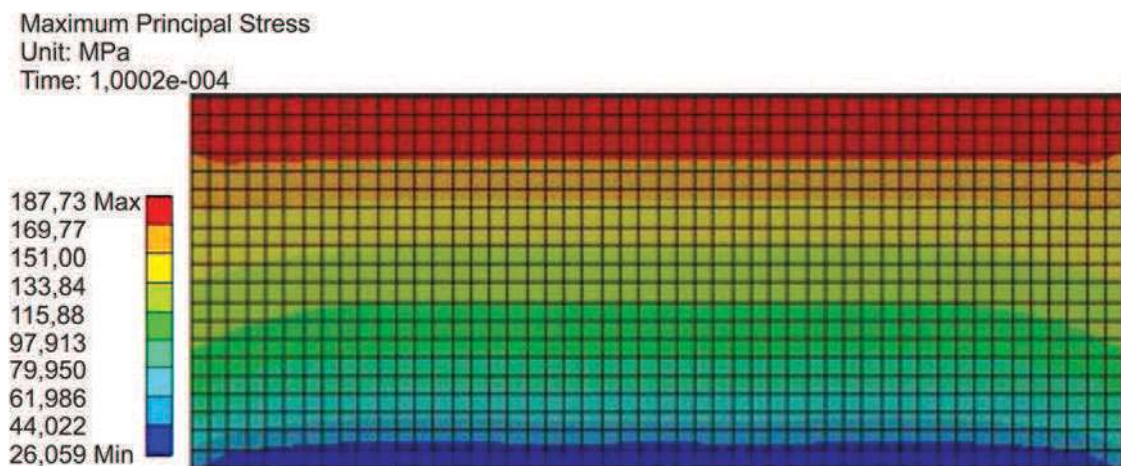
została nadana prędkość 2960 mm/s oraz odpowiednia gęstość tak, aby obciążenie odpowiadało rzeczywistej energii uderzenia młota udarowego stosowanego w eksperymencie – 15 J. Impaktor zamodelowano jako element składający się z dwóch części – uderzającej bezpośrednio w próbkę nadano właściwości stali, drugiej moduł sprężystości o rząd wielkości większy (2000 GPa), aby zapewnić odpowiednią sztywność elementu uderzającego (rys. 5).

Porównano rozkłady naprężeń maksymalnych głównych w spoinach dla jednakowych czasów obliczeniowych (rys. 6–7) zakładając, że większym wartościom naprężeń powinna odpowiadać mniejsza udarność.

Analiza map naprężeń maksymalnych głównych w spoinach badanych połączeń (rys. 6–7) dla czasu obliczeniowego 0,0001 s wskazuje, że zwiększanie modułu



Rys. 6. Mapa naprężeń maksymalnych głównych w spoinie dla czasu obliczeniowego 0,0001s – moduł Younga kleju 2000 MPa
Fig 6. Map of Max Principal Stresses distribution in the joint for the computational time equal to 0.0001 s – Young's modulus of adhesive 2000 MPa



Rys. 7. Mapa naprężeń maksymalnych głównych w spoinie dla czasu obliczeniowego 0,0001 s – moduł Younga kleju 6000 MPa
Fig 6. Map of Max Principal Stresses distribution in the joint for the computational time equal to 0.0001 s – Young's modulus of adhesive 6000 MPa

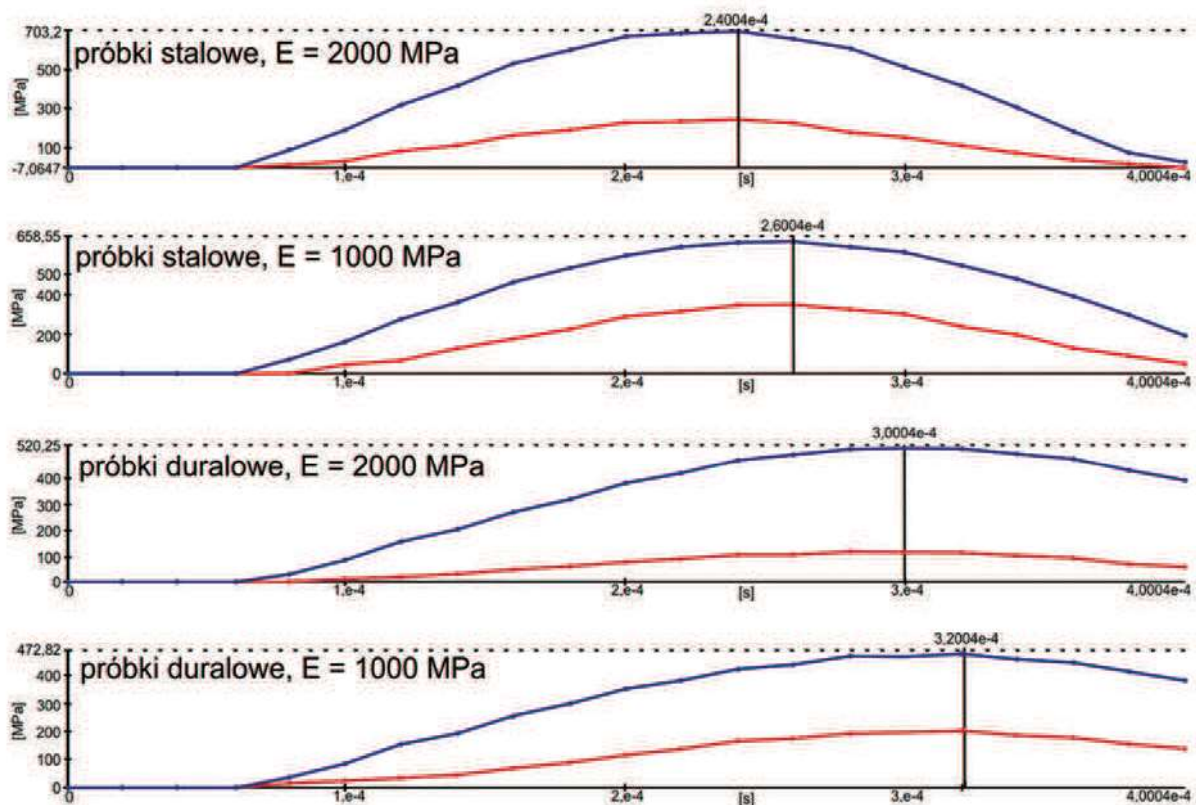
Younga kleju powoduje wzrost naprężeń, co powinno skutkować niższą udarnością połączenia.

Przeanalizowano również jak zmieniają się w czasie przebiegi naprężeń maksymalnych głównych w spoinach próbek blokowych obciążonych dynamicznie, jeśli klejone elementy są wykonane z różnych materiałów oraz klej charakteryzuje różna sztywność (rys. 8).

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że zarówno zmniejszenie modułu Younga klejonych elementów oraz kleju powoduje wydłużenie czasu (rys. 8), w którym w spoinach występuje wzrost naprężeń oraz zmniejszenie wartości naprężeń maksymalnych (zaobserwowane również na rys. 6 i 7), co powinno skutkować zwiększeniem udarności. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych.

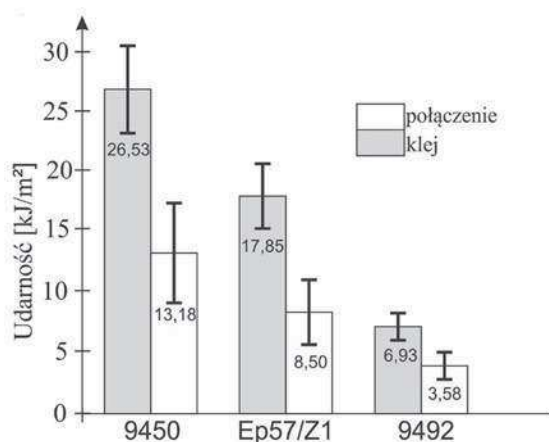
Badania zależności pomiędzy udarnością kleju i wykonanym nim połączenia

Zarówno w połączeniach jak i w postaci odlewanych próbek, klej w badaniach udarowych był obciążany z dużymi ale różnymi prędkościami (2960 lub 2093 mm/s). Ze względu na różne prędkości oraz inny sposób obciążenia udarność badanych próbek powinna być inna. W badaniach eksperymentalnych sprawdzono czy istnieje zależność pomiędzy udarnością tworzywa adhezyjnego i udarnością wykonanego z jego użyciem połączenia. Badaniom poddano 3 kompozycje klejowe (Epidian 57/ Z1, Loctite EA 9492 i Loctite EA9450), z których wykonano odlewane próbki klejowe i które zostały również wykorzystane do wykonania połączeń klejowych blokowych.



Rys. 8. Przebieg w czasie naprężeń normalnych głównych w spoinach próbek blokowych obciążonych dynamicznie w zależności od materiału, z którego wytworzono próbki i modułu Younga kleju
 Fig. 8. The time history of normal principal stresses in the joints of dynamically impact loaded block samples in accordance with the material of the samples and Young's modulus of the adhesive

Próbki klejowe o wymiarach 80×10×5 mm wykonano w 10 seriach w specjalnie do tego celu przygotowanych formach silikonowych. Wszystkie kompozycje klejowe utwardzono w temperaturze pokojowej (21°C) przez 7 dni. Badania udarności tworzyw adhezyjnych



Rys. 9. Udarność próbek klejowych i połączeń klejowych blokowych
 Fig. 9. Impact strength of bulk adhesive samples and block adhesive joints

prowadzono zgodnie z PN-EN ISO 179-1, przykładając obciążenie krawędziowo z wykorzystaniem młota wahadłowego Galdabini Impact 25, przy zastosowaniu wahadła o maksymalnej energii równej 7,5 J. Stalowe próbki blokowe przygotowano metodą opisaną w wcześniejszych badaniach. Wynik badań udarności przedstawiono na rys. 9.

Dla wszystkich badanych klejów występuje wyraźna zależność pomiędzy udarnością kleju a udarnością wykonanego nim połączenia. Dla stosowanych próbek i warunków eksperymentu, wartość udarności połączenia stanowi ok. połowę wartości udarności kleju określonej metodą Charpy'ego przy krawędziowym sposobie przyłożenia obciążenia. Ta informacja jest bardzo istotna, ponieważ pozwala przypuszczać, że dla niektórych klejów, udarność połączeń klejowych blokowych można szacować na podstawie badań udarności odlewanych próbek klejowych.

Wnioski

1. Połączenia klejowe wykonane klejami o niższych modułach Younga cechują się udarnością wyższą niż połączenia wykonane klejami o wyższych modułach Younga.

2. Wyniki badań numerycznych wskazują, że zmniejszenie modułu Younga kleju powoduje wydłużenie czasu, w którym w spoinach występuje wzrost naprężeń oraz zmniejszenie wartości naprężeń maksymalnych, co powinno skutkować zwiększeniem udarności.
3. Projektując i wykonując połączenia klejowe, które mogą być obciążane udarowo należy brać pod uwagę sztywność stosowanych klejów, a jeżeli wytrzymałość statyczna takich połączeń nie jest najważniejszym parametrem, to wydaje się, że wartość modułu Younga powinna decydować o wyborze kleju.
4. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że może występować zależność pomiędzy udarnością klejów, a udarnością wykonanych nimi połączeń. Wniosek ten wymaga jednak potwierdzenia w dalszych badaniach.

LITERATURA

- [1] Adams R.D., J. Comyn, W.C. Wake. 1997. "Structural Adhesive Joints in Engineering". Springer.
- [2] Adams R.D., J.A. Harris. 1996. "A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (16): 61–71.
- [3] Da Silva L.F.M. et. al. 2012. "Adhesive Joints: Best Practices". Wiley & Sons.
- [4] Komorek A., J. Godzimirski. 2016. "The selected aspects of the research into impact loading of adhesive joints in block samples – comparison of different ways of applying the load". *Problemy Eksploatacji* (4): 77–91.
- [5] Komorek A., P. Przybytek. 2015. "Initial research of impact strength in adhesive joints". *Solid State Phenomena* Vol. 237: 160–165.
- [6] Taylor A. 1996. "Impact Testing of Adhesive Joints". *MTS Adhesive Project 2 AEA Technology* 5 (2).

dr hab. inż. Marek Rośkiewicz – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.roskiewicz@wat.edu.pl

prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

dr inż. Andrzej Komorek – Katedra Awioniki i Systemów Sterowania Wydziału Lotnictwa Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin, e-mail: komman@op.pl

mgr inż. Jarosław Gąsior – Wojskowe Centrum Normalizacji, Jakości i Kodyfikacji, ul. Nowowiejska 28A, 00-909 Warszawa, e-mail: j.gasior@ron.mil.pl