

# BADANIE UDAROWE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH Z WYKORZYSTANIEM DEDYKOWANEGO MŁOTA WAHADŁOWEGO

## *Impact testing of adhesive joints with a dedicated pendulum hammer*

Andrzej KOMOREK, Paweł PRZYBYŁEK

---

**S t r e s z c z e n i e:** Badania udarności połączeń klejowych prowadzone są zazwyczaj z wykorzystaniem modyfikowanych urządzeń, przeznaczonych do realizacji innych badań wytrzymałościowych. Wyjątkiem jest badanie udarności próbek klejonych na rozczepienie, prowadzone z wykorzystaniem młota spadowego. Realizacja badań na urządzeniach modyfikowanych jest ograniczona ze względu na wynikającą z przeznaczenia specyfikę ich budowy. Zajmujący się problematyką udarności połączeń klejowych autorzy artykułu przeprowadzili konsultacje techniczne i zlecieli wykonanie dedykowanego urządzenia do badania udarności połączeń klejowych blokowych i zakładkowych. Urządzenie zostało wykonane w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Artykuł prezentuje wyniki wstępnych badań udarności połączeń klejowych, zrealizowanych przy wykorzystaniu dostarczonego urządzenia.

Badano połączenia zakładkowe i blokowe, wykonane przy użyciu kompozycji klejowej Epidian 57/Z1. Elementy klejone przygotowano ze stopu aluminium – 2017A. Próby połączeń blokowych prowadzono zgodnie z PN-ISO 9653, natomiast próby połączeń zakładkowych wg własnej metodyki. Uzyskane wyniki wskazują na przydatność wykonanego urządzenia do prowadzenia badań udarności połączeń klejowych. Rozrzut wyników udarności próbek blokowych jest podobny do uzyskanych podczas wykonywania badań realizowanych z wykorzystaniem modyfikowanego młota wahadłowego. Mocowanie próbek w uchwytach jest łatwe i pewne, co potwierdzono podczas analizy nagrań prób, zrealizowanych ultraszybką kamerą wideo. Konstrukcja uchwytu do badania próbek blokowych pozwala na precyzyjne ustawienie odległości impaktora od spoiny klejowej, mające istotne znaczenie dla jakości uzyskiwanych wyników.

**S ł o w a   k l u c z o w e:** klej, połączenie klejowe, udarność, młot wahadłowy

**A b s t r a c t:** Impact test of adhesive joints are usually conducted using modified equipment for the implementation of other strength tests. The exception is the impact test of samples subjected to cleavage loading carried out using the drop hammer. Execution of tests on the modified device is limited due to the specificity arising from their construction. Authors of the article who deal with the issues of impact strength have conducted technical consultations and commissioned the execution of a dedicated device for testing the impact strength of adhesive joints in the block and single lap samples. The device was made at the Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute in Radom. The article presents the preliminary results of impact strength of adhesive joints tests executed using the supplied device. In the tests were tested the block and single lap joints made using the adhesive composition Epidian 57/Z1. The adherends were made of aluminum alloy 2017A. Tests of block samples were carried out according to the Standard ISO 9653, while tests of lap joints according to our own technique. The results indicate the usefulness of the device for research impact strength of adhesive joints. Dispersion of impact strength results for block samples is similar to that achieved during tests performed using the modified pendulum. Fixing of sample in a holder is easy and secure, as confirmed by the analysis of the recordings of tests completed ultrahigh speed video camera. Design of the handle for testing of block sample allows for precise adjustment of the distance of the impactor from the adhesive layer, which is essential for the quality of the results.

**K e y w o r d s:** adhesive, adhesive joint, impact strength, pendulum hammer

---

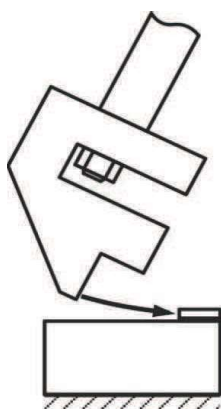
W aktualnie projektowanych i stosowanych konstrukcjach połączenia klejowe, oprócz obciążeń statycznych i zmęczeniowych, mogą być również obciążane udarowo. Przykładem tego typu konstrukcji są współczesne samochody, w których wiele elementów, np.: panele drzwiowe, maski i różne elementy z tworzyw sztucznych, są wykonywane z zastosowaniem technologii klejenia [6]. Podczas kolizji lub wypadku drogowego, zastosowane w konstrukcji połączenia klejowe są często obciążane udarowo. W celu odpowiedniego zaprojektowania i zapewnienia odporności zderzeniowej struktur klejonych prowadzi się badania i szacowania wytrzymałości udarowej stosowanych połączeń. Jak dotąd opracowano pewną, niezbyt dużą liczbę procedur szacowania parametrów udarnościowych połączeń klejowych, uwzględniających różne obszary zastosowań, a kilka z nich zostało zaadaptowanych jako

procedury normatywne. Techniki wykorzystujące młoty wahadłowe są najczęściej stosowanymi metodami dla stosunkowo niskich prędkości działania obciążenia. Normatywna metodyka, zawarta w PN-ISO 9653, jest odmianą takiego badania, wykorzystującego młot wahadłowy, zmodyfikowany do prowadzenia badań połączeń klejowych – jest to najbardziej popularna metodyka. Używając tej technologii, energię traconą podczas niszczenia próbki – czyli wytrzymałość udarową połączenia [7] można wyznaczyć na podstawie różnicy wysokości wahadła przed i po uderzeniu. Badania tą metodą są trudne do powtórnej realizacji ze względu na konieczność bardzo dokładnego zachowania parametrów próbek i warunków badań [1, 4].

Próbki do badań zbudowane są z dwóch elementów. Dolnym elementem jest prostopadłościan o wymiarach

umożliwiających umieszczenie go w uchwycie maszyny w taki sposób, aby nie miał możliwości przemieszczenia się w momencie przyłożenia obciążenia. Drugi element to metalowa płytko o szerokości prostokątności i wysokości 3-5 mm. Badanie prowadzone jest przy pomocy młota wahadłowego, którego impaktor, zgodnie z PN-ISO 9653 [5], powinien uderzać w górny element próbki w sposób przedstawiony na rys. 1.

Metoda badania udarowego połączeń klejowych blokowych, przy zapewnieniu powtarzalności warunków prowadzenia testów, pozwala uzyskać wyniki udarności połączeń wykonanych różnymi kompozycjami klejowymi, jednak trudno jest zastosować otrzymane wyniki w praktyce [3]. W celu uzyskania wyników, mogących znaleźć szersze zastosowanie w projektowaniu i wykonywaniu



Rys. 1. Schemat badania udarności w metodzie ścinania udarowego próbki blokowej

Fig. 1. A scheme of the block impact test



Rys. 2. Urządzenie do badań udarności połączeń klejowych „Julietta”

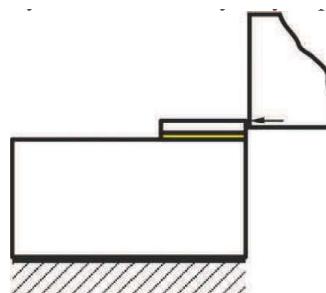
Figure. 2. The device for impact tests of adhesive bonds

konstrukcji klejonych prowadzi się badania udarowe połączeń klejowych zakładkowych [2, 3]. Badania te również mogą być prowadzone z wykorzystaniem zmodyfikowanego młota wahadłowego i specjalnie przygotowanych próbek.

W celu realizacji badań udarowych połączeń klejowych blokowych i zakładkowych zlecono zaprojektowanie i wykonanie dedykowanego do tego typu badań młota wahadłowego. Realizacji zadania podjął się Instytut Technologii Eksploatacji PIB z Radomia i tak powstał młot wahadłowy „Julietta” (rys. 2), którego możliwości badawcze zaprezentowano w artykule.

### Metodyka prowadzenia badań

Wszystkie badania eksperymentalne przeprowadzono przy użyciu młota wahadłowego „Julietta”, który zapewnia wykonywanie testów udarowych próbek blokowych dwiema metodami. Pierwsza z nich to metoda bazująca na PN-EN-ISO 9653, której schemat przedstawiono na rys. 1. Aby wyniki testu były miarodajne, ważne jest utrzymanie warunków przedstawionych w normie, z których wynika m.in., że część młota, która uderza w próbkę, powinna być płaska, szersza od elementu w który uderza oraz ustawiona równoległe do niego. Dolna krawędź młota powinna uderzyć w górny element próbki w obrębie 0,80 mm (1/32 in) nad spoiną [5]. Utrzymanie tych warunków jest w pełni zabezpieczone w wykonanym urządzeniu badawczym, które dzięki dostarczonym przez wykonawcę wkładkom umożliwia regulację wysokości przyłożenia obciążenia. Jednak stały uchwyt próbki stanowi pewien problem, jeżeli badającemu zależy na prowadzeniu testów z połączeniami klejowymi o różnych powierzchniach, ponieważ regulacja pola powierzchni spoiny odbywa się przez zmianę długości górnego elementu próbki, co skutkuje zmianą geometrii próbki. Przy takim sposobie przyłożenia obciążenia (rys. 1) i zabudowanym na stałe uchwycie próbki, niemożliwe staje się uderzenie impaktora w element próbki wtedy, kiedy znajduje się on w najniższym położeniu, a jego energia kinetyczna jest maksymalna. W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano, aby impaktor uderzał od czoła próbki (rys. 3), co uniezależni miejsce przyłożenia obciążenia od wybranej długości spoiny. W efekcie konsultacji,



Rys. 3. Schemat badania w metodzie przyłożenia obciążenia od czoła próbki

Fig. 3. The scheme of impact loading from the front of the sample

wykonawca dostarczył uchwyt, który umożliwił prowadzenie prób dwiema metodami.

Normatywna metodyka badań uderowych połączeń klejowych zakładkowych nie istnieje, dlatego zaproponowano, aby wykonane urządzenie umożliwiała prowadzenie badań z wykorzystaniem próbek stosowanych do badań statycznych połączeń klejowych.

Normatywna metodyka badań uderowych połączeń klejowych zakładkowych nie istnieje, dlatego zaproponowano, aby wykonane urządzenie umożliwiała prowadzenie badań z wykorzystaniem próbek stosowanych do badań statycznych połączeń klejowych. Podczas prowadzenia badań połączeń zakładkowych zwracano szczególną uwagę na pewność mocowania elementów próbki w uchwytach, umożliwiających realizację badania oraz na sposób mocowania próbek w uchwytach.

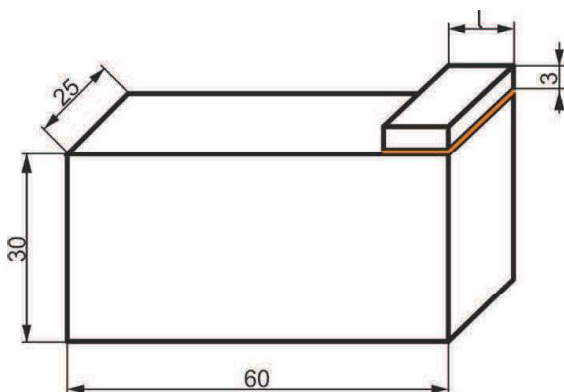
Warto również zwrócić uwagę na dwie cechy urządzenia badawczego:

- możliwość płynnej zmiany maksymalnej wartości energii stosowanej w badaniach, czego nie oferują tradycyjne młoty wahadłowe. Zmiana maksymalnej energii odbywa się przez zmianę wysokości zrzutu wahadła, co skutkuje także zmianą wartości prędkości wahadła – ten parametr może mieć istotne znaczenie dla udarności połączeń wykonywanych z użyciem kleju, który jest materiałem lepkosprężystym,
- realizacja badania w cyklu półautomatycznym, co pozwala na prosty, programowy wybór prędkości działania obciążenia.

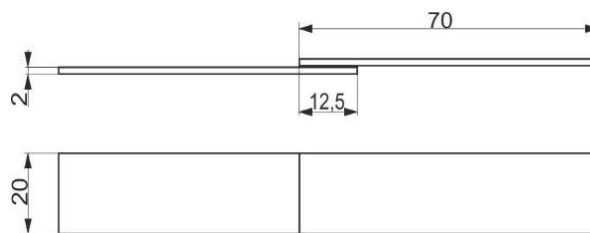
#### Próbki do badań

W celu przeprowadzenia badań przygotowano próbki klejone blokowe i zakładkowe. Elementy próbek blokowych wykonano ze stali S235 lub ze stopu aluminium 2017A. Wymiary próbek blokowych stosowanych w badaniach przedstawiono na rys. 4. Na podstawie wyników badań [4] długość  $l$  górnego elementu ustalono na 10 mm.

Próbki zakładkowe wykonano ze stopu aluminium 2017A, a ich wymiary przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Próбка blokowa  
Fig. 4. A block joint sample



Rys. 5. Próбка zakładkowa  
Fig. 5. A single lap joint sample

Powierzchnie przeznaczone do klejenia przygotowano z wykorzystaniem obróbki strumieniowo-ścierniej, a jako medium ściernie wykorzystano żużel pomiedziowy. Przed naniesieniem kleju, elementy próbek przemyto benzyną ekstrakcyjną, a następnie ułożono na podstawkach i umieszczono w komorze suszarki laboratoryjnej w celu odparowania benzyny.

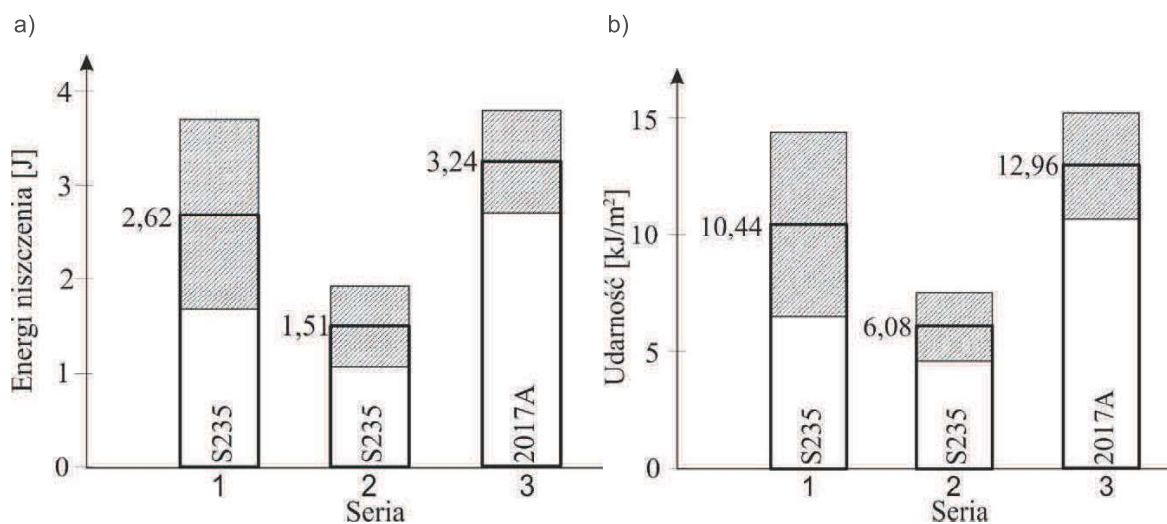
Do klejenia próbek wykorzystano kompozycję klejową Epidian 57 z utwardzaczem Z1 w stosunku 10:1. Serie próbek klejono jednocześnie w tych samych warunkach, a liczność każdej serii wynosiła 10. Po nasieniu kleju na powierzchnie elementów klejonych składano je do klejenia, zwracając szczególną uwagę na odpowiednie wzajemne położenie obydwu części próbki. Tak przygotowane próbki blokowe utwardzano pod stałym naciskiem przez okres 7 dni w temperaturze pokojowej (21°C). Próbki zakładkowe składano do klejenia w uchwycie wydrukowanym w technologii 3D. Próbki zakładkowe podzielono na dwie serie. Pierwszą z nich utwardzano przez 14 dni, a drugą 7 dni w temperaturze pokojowej (21°C).

Po utwardzeniu spoin klejowych przeprowadzono obróbkę wykańczającą, polegającą na usunięciu wypływek nadmiaru kleju spomiędzy powierzchni łączy. Zwracano także uwagę (szczególnie w próbkach blokowych) na poprawność położenia obydwu elementów próbki. Uzyskane grubości spoin we wszystkich próbkach były jednakowe i wynosiły 0,05 mm.

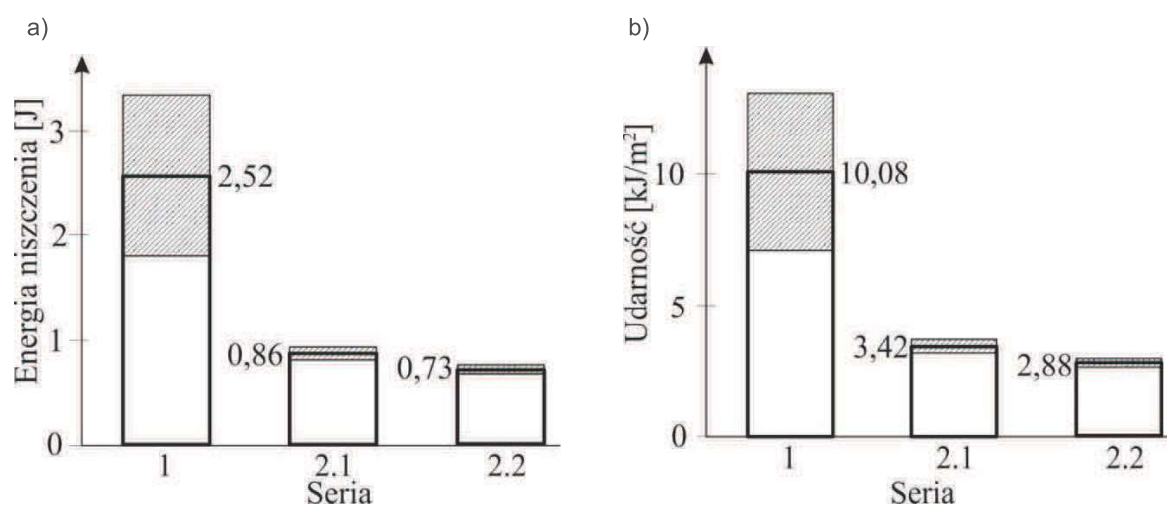
#### Badania eksperymentalne i dyskusja wyników

Badania próbek blokowych prowadzono wg schematu przedstawionego na rys. 3. Maksymalna energia możliwa do uzyskania w badaniach próbek blokowych wynosiła 10 J, a prędkość badania 2,42 m/s. Odległość impaktora od dolnego elementu próbki wynosiła 0,85 mm. Zbadano trzy serie próbek, z których dwie wykonano ze stali S235, a jedną ze stopu aluminium. Realizacja badań próbek blokowych jest prosta i intuicyjna. Wyniki badań próbek blokowych przedstawiono na rys. 6.

Analizując stan powierzchni przełomów po badaniach dostrzeżono, że połączenia, które cechowały się wyraźnie większymi wartościami wytrzymałości uderowej uległy zniszczeniu kohezyjnemu, natomiast zniszczenia pozostałych połączeń miały charakter kohezyjno-adhezyjny. W przyszłych badaniach należy zwrócić uwagę na



Rys. 6. Energia niszczenia (a) i udarność próbek blokowych (b)  
 Fig. 6. The energy of failure (a), and impact strength of block joints (b)



Rys. 7. Energia niszczenia (a) i udarność próbek zakładkowych (b)  
 Fig. 7. The energy of failure (a), and impact strength of lap joints (b)

charakter zniszczenia połączenia w odniesieniu do wytrzymałości udarowej połączenia. Ten wniosek jest zbieżny z obserwacjami [7] o związku rodzaju zniszczenia połączenia z uzyskiwanymi wynikami badań.

Podczas kontroli elementów klejonych po przeprowadzonych testach nie stwierdzono plastycznego odkształcenia nakładek do których było przykładane obciążenie, bez względu na materiał z jakiego były wykonane.

Badania próbek zakładkowych wymagały wymiany uchwytów próbek i impaktora zabudowanego w wahadle, co jest procesem dość czasochłonnym. Maksymalna energia możliwa do uzyskania w badaniach próbek zakładkowych wynosiła 10 J. W trakcie prowadzonych testów zbadano dwie serie próbek. Wszystkie próbki zakładkowe uległy zniszczeniu. Obsługa urządzenia podczas badania próbek zakładkowych jest bardziej czasochłonna niż podczas badania połączeń blokowych. Mocowanie próbek zakładkowych w uchwycie jest

możliwe do zrealizowania dwiema metodami, w których różnica polega na tym, że impaktor uderza w element dolny lub górny próbki. Drugą serię próbek rozdzielono i pięć próbek przebadano dla przypadku przyłożenia obciążenia do górnego elementu (seria 2.1), a w pozostałych próbkach obciążenie przykładano do dolnego elementu (seria 2.2) (rys. 7).

Analizując wyniki można zauważyć bardzo dużą różnicę udarności próbek z serii 1 i 2, co jednak w analizie metodyki badawczej nie jest najistotniejsze. Najważniejszy jest bardzo mały rozrzut wyników dla próbek serii 2.1 i 2.2, niespotykany w dotychczas przeprowadzonych przez autorów badaniach. Przyczyny uzyskania tak rozbieżnych wyników, zarówno co do wartości jak i rozrzutu, na obecnym etapie badań są trudne do wyjaśnienia. Można wiązać je wyłącznie z długością czasu sieciowania spoin klejowych, lecz to przypuszczenie wymaga potwierdzenia w dalszych badaniach.

## Wnioski

Analiza wyników i przebiegu badań pozwoliła wyciągnąć następujące wnioski:

1. Urządzenie umożliwia prowadzenie badań udarowych próbek blokowych i zakładkowych oraz zabezpieczenia potrzeby w zakresie prowadzenia tego typu badań z zastosowaniem młota wahadłowego.
2. Mocowanie próbki blokowej w uchwycie jest pewne. Mocowanie próbki zakładkowej również wydaje się być pewne, jednak w celu potwierdzenia tego niezbędne jest wykonanie rejestracji przebiegu badania ultraszybką kamerą, co zostanie przeprowadzone podczas prowadzenia kolejnych testów.
3. Wykonywanie testów próbek blokowych może być realizowane dla różnych powierzchni spoiny klejowej (zmiennej długości nakładki), bez konieczności stosowania dodatkowych elementów mocujących.
4. Mocowanie próbek zakładkowych pozwala na badanie próbek o różnych wartościach powierzchni klejonych, co umożliwia konstrukcja uchwytów mocujących.
5. Uchwyty mocujące ograniczają szerokość badanych próbek zakładkowych do 20 mm.
6. Wyniki badań połączeń blokowych cechują się bardzo dużym rozrzutem, co może ograniczać możliwość porównania wyników różnych testów. Odchylenie standardowe wyników dla próbek wykonanych ze stopu aluminium jest znacznie mniejsze niż dla próbek stalowych, co może stanowić cenną wskazówkę do dalszych badań.
7. Badania wskazują, że połączenia zakładkowe mogą być bardziej obiecujące w badaniach udarności połączeń klejowych, ze względu na mały rozrzut wyników, co prawdopodobnie pozwoli na zmniejszenie liczności serii.
8. Badania zaprezentowane w artykule miały charakter badań wstępnych. Podczas analizy ich wyników zaobserwowano wiele interesujących zjawisk, które jednak trudno scharakteryzować na podstawie tak małej liczby przeprowadzonych testów. W celu wyjaśnienia problemów związanych z metodyką badawczą i jakością uzyskiwanych wyników, przeprowadzone zostaną dalsze badania eksperymentalne i numeryczne.

9. Wstępne badania wskazują, że udarność połączeń elementów wykonanych ze stopu aluminium jest wyższa niż udarność połączeń elementów stalowych.
10. Wydaje się, że warto rozważyć modyfikację urządzenia badawczego tak, aby możliwa była rejestracja siły i przemieszczenia podczas przebiegu niszczenia połączenia klejowego oraz lepsza możliwość rejestracji przebiegu badania ultraszybką kamerą (zmiana kształtu wahadła).
11. W celu określenia charakteru zniszczenia spoiny klejowej, muszą być stosowane obserwacje mikroskopowe lub inne metody wykrywania pozostałości kleju na powierzchniach klejonych.

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Belingardi G., L. Goglio, M. Rossetto. 2005. "Impact behaviour of bonded built-up beams: experimental results". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (25): 173–180.
- [3] Harris J.A., R.D. Adams. 1985. "An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 199, C2, 121–131.
- [4] Komorek A., P. Przybyłek. 2015. "Initial research of impact strength in adhesive joints". *Solid State Phenomena*, Vol. 237: 160–165.
- [5] PN-ISO 9653 – Kleje. Metody badania wytrzymałości na ścinanie udarowe połączeń klejowych 2000.
- [6] Sato C. 2005. "Impact behavior of adhesively bonded joints" [in:] *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*, red. Adams R.D. WPL, Cambridge, p. 164–188.
- [7] Taylor A. 1996. "Impact Testing of Adhesive Joints". *MTS Adhesive Project 2 AEA Technology* (2).

---

Dr inż. Andrzej Komorek – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin, e-mail: komman@op.pl

Mgr inż. Paweł Przybyłek – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych ul, Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin, e-mail: sqcdr@wp.pl