

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

8(4)/2016, 53-61

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

---

Paweł MAĆKOWIAK, Bogdan LIGAJ

**METODY WYZNACZANIA KRZYWYCH NAPRĘŻENIE –  
ODKSZTAŁCENIE TWORZYW ADHEZYJNYCH**

**Streszczenie:** Do przeprowadzenia obliczeń analitycznych, jak i numerycznych połączeń klejonych niezbędna jest znajomość właściwości mechanicznych zastosowanego tworzywa adhezyjnego. Wyznaczenie wykresu naprężenie-odkształcenie dostarcza informacji o module Younga, doraźnej wytrzymałości, granicy plastyczności, maksymalnym odkształceniu, a także danych do przeprowadzenia analiz dla zakresu odkształceń plastycznych. Metody uzyskiwania powyższych danych dla tworzyw adhezyjnych, różnią się od standardowych metod stosowanych dla metali i tworzyw sztucznych. W pracy porównano różne metody wyznaczania wykresu naprężenie-odkształcenie z zaznaczeniem zalet i wad pozwalających badaczowi na wybór metody i odpowiednie zinterpretowanie otrzymanych wyników.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejone, klej, właściwości mechaniczne

## 1. WSTĘP

Połączenia klejone są coraz częściej stosowane do łączenia elementów w budowie maszyn. Czynniki, które powodują tę tendencję są: poprawa właściwości tworzyw adhezyjnych, łatwość i mniejsza czasochłonność wykonania połączenia, konieczność łączenia elementów wykonanych z różnych materiałów. Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcji wymusza przeprowadzenie obliczeń ich wytrzymałości i trwałości, co stanowi wyzwanie dla konstruktorów. Spoina klejona, wykonana z materiałów o zasadniczo różnych właściwościach mechanicznych od reszty konstrukcji, wymaga często zastosowania dokładnej i skomplikowanej analizy. Ze względu na czasochłonność metod analitycznych konstruktorzy coraz częściej wspomagają się programami do analiz numerycznych. Metody te bazują na znajomości podstawowych właściwości mechanicznych tworzywa adhezyjnego, które nie są zwykle podawane przez producentów. Wyznaczenie ich wymaga zastosowania specjalnych metod i rozwiązania problemów, które nie występują podczas badań metali i tworzyw polimerowych.

---

mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,  
e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

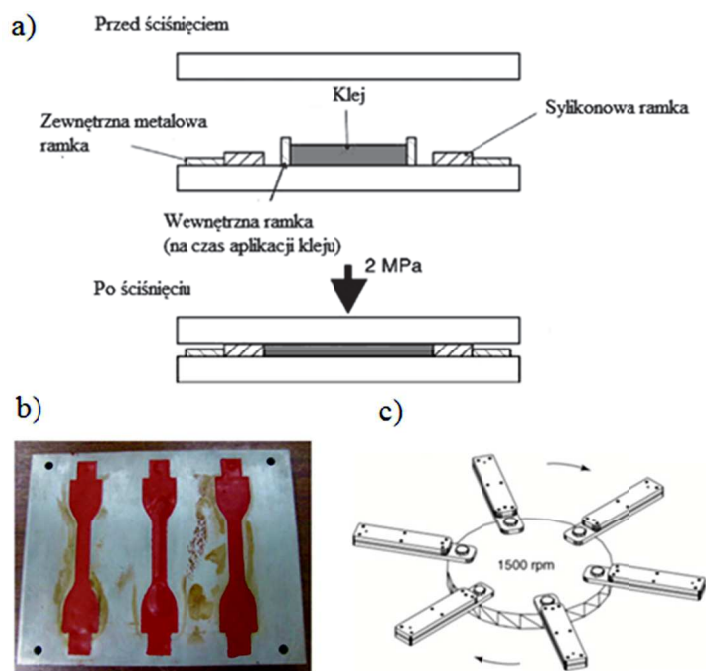
dr hab. inż. Bogdan LIGAJ, prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,  
e-mail: bogdan.ligaj@utp.edu.pl

Celem pracy jest przedstawienie metod wykorzystywanych do wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych tworzyw adhezyjnych (krzywych naprężenie-odkształcenie).

Zakres pracy obejmuje porównanie stosowanych metod wyznaczania modułu Younga oraz doraźnej wytrzymałości na rozciąganie tworzyw adhezyjnych.

## 2. PRÓBKIE ODLEWANE

Do wyznaczania krzywych naprężenie-odkształcenie materiałów adhezyjnych stosuje się najczęściej próbki odlewane. Znane są różne techniki wytwarzania odlewów tworzyw adhezyjnych: w formach silikonowych, teflonowych, metalowych pokrytych rozdzielaczem. Wytwarzanie próbek z tworzyw adhezyjnych można zrealizować dwiema metodami. Pierwsza metoda polega na odlaniu płyt z masy klejącej, następnie wycinaniu poprzez obróbkę mechaniczną docelowego kształtu (rys. 1) [2, 3].



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie metod wykonywania próbek:  
 a – metoda odlewania płyty z tworzywa adhezyjnego [2],  
 b – metoda odlewania gotowych próbek w formie [3],  
 c – metoda odlewania próbek w „wirówce” [2]

Fig. 1. Schematic representation of the production methods of specimens:  
 a – casting method of the adhesive material board [2],  
 b – a method of pouring the samples fabricated in the form [3],  
 c – a method of cast the samples in a centrifuge [2]

Metoda druga polega na wykonaniu odlewów tworzyw adhezyjnych w formach o określonych cechach geometrycznych [3, 5]. Pierwsza metoda jest skuteczniejsza dla tworzyw adhezyjnych o większej lepkości, natomiast druga dla materiałów o małej lepkości. Rozwinięciem drugiej metody jest zastosowanie wirówki, która dzięki ciśnieniu hydrostatycznemu w wirującej formie rozprowadza równomiernie odlewany materiał, odprowadzając zarazem pęcherze gazu [3].

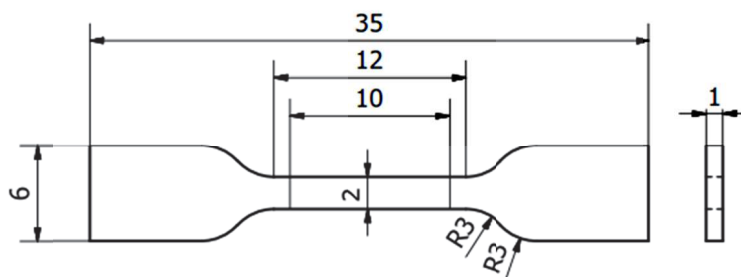
W badaniach wytrzymałościowych, mających na celu określenie istotnych parametrów fizycznych, wytwarza się próbki: gładkie walcowe odlewane np. w polietylenowych strzykawkach [4], płyty [1], a także próbki z pomniejszonym przekrojem części pomiarowej typu wioselko [5, 6]. Próbki odlewane podaje się próbie rozciągania i ściskania.

### 2.1. Próbki odlewane poddawane próbie ściskania

Odlewane próbki można poddać próbie ściskania celem wyznaczenia krzywych naprężenie-odkształcenie i modułu sprężystości podłużnej (moduł Younga). Zaletą tej metody jest uzyskanie większego poziomu odkształceń w próbce w stosunku do poziomu odkształceń uzyskanych podczas próby rozciągania. Przeprowadzenie badań dla większego zakresu zmian odkształceń pozwala na określenie zmian właściwości tworzyw adhezyjnych zastosowanych w cienkich spoinach [4]. Ograniczeniem tej metody jest założenie takich samych właściwościach mechanicznych materiału (kleju) przy rozciąganiu i ściskaniu [1]. Niewielkie wymiary próbek mogą również uniemożliwić założenie ekstensometru i wymusić na badaczu opieranie się na pośrednich odczytach odkształcenia z analizy przemieszczenia trawersu maszyny wytrzymałościowej. Metoda badania jest przedmiotem normy PN-EN ISO 604:2006 [7].

### 2.2. Próbki odlewane poddawane próbie rozciągania

Kształt i wymiary próbek odlewanych poddawanych próbie rozciągania zdefiniowane są w normie PN-EN ISO 527-2:2012 [8] i PN-EN ISO 527-3:1998 [9]. Ze względu na egzotermiczny proces utwardzania się kleju, podczas odlewania próbek na szczególną uwagę zasługują kształtki małe, których wymiary są najbardziej zbliżone do wymiarów spoiny klejonej (rys. 2).



Rys. 2. Małe kształtki do oznaczania właściwości tworzyw polimerowych przy rozciąganiu  
Fig. 2. Small specimen for the determination of the mechanical tensile properties of plastics materials

W normie określono prędkość odkształcenia wynoszącą 1% długości odcinka pomiarowego na minutę, do której należy dążyć podczas oznaczania modułu sprężystości podłużnej. Ekstensometr powinien obejmować całą część pomiarową próbki.

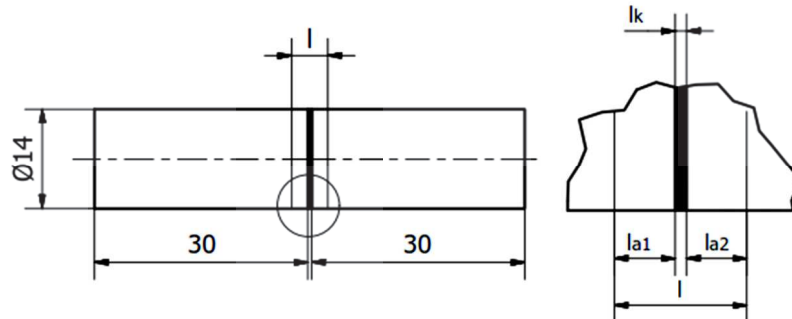
Na podstawie próby rozciągania uzyskuje się więcej danych niż na podstawie próby ściskania. Do osiągnięcia granicy plastyczności wyznaczone właściwości mogą być podobne w obu próbach, ale po jej przekroczeniu mogą wystąpić różnice. W przypadku próby ściskania wyższe wartości może osiągać dozna wytrzymałość i maksymalne odkształcenie. Z uwagi na większą wytrzymałość połączeń klejonych na ściskanie niż odrywanie, różnica otrzymanych wyników w obu próbach może mieć istotne znaczenie dla określenia wytrzymałości projektowanych złączy [1, 4].

### 3. PRÓBKİ TYPU IN-SITU

Inny typ próbek do wyznaczania wykresu naprężenie-odkształcenie stanowią próbki *in-situ*. Próbka do badań ma za zadanie odzwierciedlać wymiary rzeczywistego połączenia, charakteryzującego się małym wymiarem warstwy kleju. Próbka składa się z elementów sklejanых połączonych warstwą lub kilkoma warstwami kleju. Niektórzy badacze uzyskują różne wykresy naprężenie-odkształcenie dla próbek odlewanych oraz *in situ* [1, 2]. Różnice tłumaczy się wpływem wielu czynników. Wymienić należy najistotniejsze z nich. Pierwszym są reakcje fizykochemicznych w granicznej warstwie między elementami sklejanymi a klejem. Drugim czynnikiem jest ukierunkowany docisk, który może porządkować strukturę wiążącego kleju i powodować jego anizotropowość. Trzecim jest zwiększenie sztywności cienkiej warstwy kleju przez przylegające do niej elementy sklepane o dużo większym module Younga. Sztywność ta wynika bezpośrednio z zablokowania swobodnego przewężenia kleju, co skutkuje występowaniem trójosiowego stanu naprężeń w spoinie. Czwarty czynnik dotyczy spiętrzenia naprężeń na krawędzi spoiny połączenia czołowego.

#### 3.1. Próbki czołowe z jedną warstwą kleju

Istnieje wiele rodzajów próbek *in situ*. Pierwszy podział dotyczy ilości warstw kleju. Próbki o pojedynczej warstwie kleju, składają się z dwóch metalowych bądź drewnianych elementów sklejanых doczołowo (PN-EN 15870:2009) [10] (rys. 3).



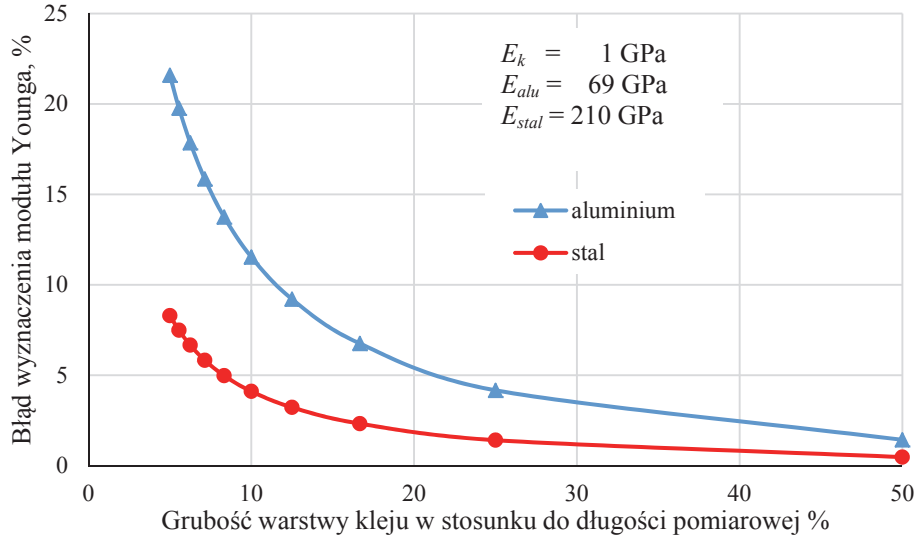
Rys. 3. Próbką doczołowa z jedną warstwą kleju  
Fig. 3. Butt specimen with one adhesive layer

Norma przewiduje dwa przekroje elementów sklejaných: kołowy i kwadratowy oraz podaje zalecany wymiar średnicy bądź krawędzi: 10, 15, 25 i 50 mm. Długość elementów sklejaných powinna wynosić trzykrotność średnicy (krawędzi), lecz nie więcej niż 50 mm. Prędkość rozciągania powinna być tak dobrana, aby zerwanie próbki następowało po  $60 \pm 20$  s.

Próbki montuje się w uchwytach maszyny wytrzymałościowej z założonym ekstensometrem, który powinien obejmować warstwę kleju i przyległe części sklejaných elementów. Moduł Younga tworzyw adhezyjnych jest zazwyczaj znacznie niższy od modułów Younga łączonych materiałów. Dla przykładu niektóre kleje epoksydowe mają moduł Younga rzędu 2 GPa, kleje metakrylowe rzędu 1 GPa. Najczęściej stosowanym materiałem sklejanym w omawianych próbkach jest aluminium o module Younga około 69 GPa. Przy tak dużej różnicy wynoszącej ponad 30 razy, odkształcenia względne tworzywa adhezyjnego są dużo większe niż materiałów sklejaných. Przy niewielkiej długości pomiarowej można założyć całkowitą sztywność materiałów sklejaných.

Błąd wyznaczonej wartości modułu Younga materiału adhezyjnego, wynikający z odkształcenia sklejaných części, rośnie wraz ze zwiększeniem długości pomiarowej próbki, przy zachowaniu stałej grubości spoiny (rys. 4). Błąd jest ponadto większy przy mniejszej różnicy sztywności kleju i elementów sklejaných.

Celem zwiększenia dokładności pomiaru można odjąć odkształcenia części sklejaných. W tym celu należy znać dokładne wartości modułu Younga materiałów łączonych i wyliczyć odkształcenia wynikające z ich obciążenia. Połączenia klejone doczołowe zazwyczaj ulegają zniszczeniu przy naprężeniach niższych od granicy stosowalności prawa Hooke'a materiałów łączonych, co pozwala w prosty sposób uzyskać pełen wykres naprężenie-odkształcenie dla samej warstwy kleju.



Rys. 4. Wpływ udziału grubości kleju w stosunku do całej długości pomiarowej na wartość błędu wyznaczonego modułu Younga

Fig. 4. Influence of the thickness of the adhesive relative to the whole measuring length on the error value which is determined Young's modulus

Zmierzone odkształcenie  $\Delta l$  jest sumą odkształcenia warstwy kleju  $\Delta l_k$  i przyległych części sklejaných pomiędzy nóżkami ekstensometru  $\Delta l_a$ . Można zatem wyznaczyć odkształcenie warstwy kleju za wzoru:

$$\Delta l_k = \Delta l - \Delta l_a \quad (1)$$

Znając moduł Younga sklejaných części  $E_a$  i poziomy naprężen  $\sigma$  można wyznaczyć ich odkształcenia  $\Delta l_a$ :

$$\Delta l_a = \frac{\sigma}{E_a} \cdot l_a \quad (2)$$

Odształcenia względne  $\varepsilon_k$  w warstwie kleju wyznacza się ze wzoru:

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta l_k}{l_k} \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta l_k$  – zmiana długości warstwy kleju,  
 $l_k$  – długość początkowa warstwy kleju.

Ostatecznie otrzymujemy wzór na moduł Younga kleju  $E_k$ :

$$E_k = \frac{\sigma}{\varepsilon_k} = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l - \left(\frac{\sigma}{E_a} \cdot l_a\right)}{l_k}} \quad (4)$$

Wyznaczony w ten sposób moduł Younga kleju jest obarczony jeszcze jednym rodzajem błędu, wynikającym z hamowania odkształceń poprzecznych do kierunku działania siły tworzywa adhezyjnego przez sztywniejszy materiał elementów sklejanых. W wyniku różnicy sztywności warstwa kleju ulega większemu przewężeniu niż elementy sklepane. Powoduje to powstanie w warstwie kleju dodatkowych promieniowych i obwodowych naprężeń. Zakładając, że gdy przewężenie materiałów łączonych jest bliskie 0, powstałe naprężenia będą wynosiły:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \left( \frac{\nu_k}{1 - \nu_k} \right) \sigma \quad (5)$$

gdzie:  $\sigma$  – naprężenia w osi przyłożenia siły,  
 $\sigma_r$  – naprężenia promieniowe,  
 $\sigma_\theta$  – naprężenia obwodowe,  
 $\nu_k$  – współczynnik Poissona kleju.

Występowanie dodatkowych naprężeń podnosi sztywność połączenia, co powoduje, że moduł Younga kleju  $E_k'$  pozornie osiąga większą wartość:

$$E_k' = \frac{\sigma}{\varepsilon_k} = \frac{E_k (1 - \nu_k)}{(1 + \nu_k)(1 - 2\nu_k)} \quad (6)$$

Celem wyznaczenia rzeczywistej wartości modułu Younga  $E_k$ , należy po wyznaczeniu z doświadczenia wartości  $E_k'$  podstawić ją do poniższego wzoru:

$$E_k = \frac{E_k' (1 + \nu_k)(1 - 2\nu_k)}{(1 - \nu_k)} \quad (7)$$

Przy założeniu, że dla klejów strukturalnych wartość współczynnika Poissona mieści się w zakresie od 0,3 do 0,4, rzeczywisty moduł Younga jest od 0,47 do 0,74 mniejszy od pozornie wyznaczonego w doświadczeniu.

W próbkach doczołowych występuje wzrost naprężeń na brzegach połączenia, co w przypadku kruchych tworzyw adhezyjnych, powinno powodować zniszczenie przy mniejszym naprężeniu średnim niż w próbkach odlewanych. Podczas badania tworzyw adhezyjnych plastycznych, próbki doczołowe mogą być wytrzymalsze ze względu na usztywnienie połączenia przez elementy sklepane i wywołany tym samym trójosiowy stan naprężenia w spoinie.

### 3.2. Próbki czolowe z kilkoma warstwami kleju

Podczas badania próbek czolowych problemem jest pomiar niewielkich odkształceń pojedynczej cienkiej warstwy. Dla przykładowego kleju metakrylowego, grubość warstwy wynosi 0,5 mm, a moduł Younga 1 GPa. Przy naprężeniu połączenia na poziomie 10 MPa, spodziewane odkształcenie wynosić będzie zaledwie 0,005 mm. Pomiar tak niewielkich odkształceń może być problematyczny ze względu na dokładność stosowanego ekstensometru. Niektóre

tworzywa adhezyjne wymagają mniejszej grubości połączenia poniżej 0,1 mm, co powoduje jeszcze większe problemy pomiarowe. Celem zwiększenia mierzonych wartości odkształceń można zastosować próbki z wieloma warstwami kleju. Rosyjska norma (OCT 90245-76) opisuje próbkę składającą się z 11 warstw kleju łączących 10 krążków i dwa elementy chwytowe z metalu (rys. 5). Podczas, gdy próbki doczołowe z pojedynczą warstwą kleju są łatwiejsze technologicznie do wykonania, drugi rodzaj próbek umożliwia pomiar większych odkształceń i podwyższa jego dokładność.



Rys. 5. Próbkę doczołowa umożliwiającą pomiar 11 warstw kleju, zalecana przez rosyjską normę OCT 90245-76 [5]

Fig. 5. Butt specimen enables measurement of 11 adhesive layers, recommended by the Russian norm OCT 90245-76 [5]

#### 4. PODSUMOWANIE

Istnienie wielu metod wyznaczania wykresów naprężenie odkształcenie oraz modułu Younga dla tworzyw adhezyjnych jest spowodowane niedoskonałością każdej z nich. Próbki odlewane są trudne technologicznie w wykonaniu i nie odzwierciedlają rzeczywistych procesów zachodzących podczas tworzenia połączenia. Jedną ze znaczących trudności tego sposobu wytwarzania próbek jest egzotermiczny charakter sieciowania kleju. Dla dużej objętości próbek odlewanej wysoka temperatura może spowodować zmiany struktury, powstawanie wad i w konsekwencji zmianę właściwości mechanicznych próbek. Tworzywa stosowane na połączenia klejone cechują się wysoką adhezją, która może utrudnić, a czasami uniemożliwić oddzielenie odlanej próbki od formy. Zaletą przeprowadzenia badania rozciągania odlewanych próbek jest możliwość uzyskania w próbkach jednoosiowego stanu naprężeń.

W przypadku próbek doczołowych może dochodzi do koncentracji naprężeń na brzegach połączenia. Można się zatem spodziewać, że przy zastosowaniu tworzywa adhezyjnego kruchego, próbki doczołowe ulegać będą zniszczeniu przy mniejszym naprężeniu średnim niż próbki odlewane. Podczas, badania tworzyw adhezyjnych plastycznych, próbki doczołowe mogą być wytrzymalsze ze względu na usztywnienie połączenia przez elementy sklejjane i wywołany tym samym trójosiowy stan naprężeń w spoinie. Złożony stan naprężeń w próbkach doczołowych uniemożliwia uzyskanie wprost wykresu naprężenie-odkształcenie, a po-



średnie wyniki po przeliczeniach obarczone są błędami wynikającymi z zastosowanych uproszczeń. Próbki doczołowe mimo to odzwierciedlają rzeczywiste warunki wiązania kleju w połączeniu, zwłaszcza małą objętość i zastosowany docisk.

Przedstawiony w pracy przegląd metod wyznaczania krzywych naprężenie-odkształcenie, modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie wskazuje na skomplikowany charakter zagadnienia. Każda z przedstawionych metod posiada swoje wady i zalety, których badający musi być świadomy, podejmując decyzję o wyborze jednej z nich.

## LITERATURA

- [1] ADAMS R.D., WAKE W.C.: Structural Adhesive Joints in Engineering. London: Elsevier; 1984.
- [2] da SILVA L.F.M., DILLARD D.A., BLACKMAN B., ADAMS R.D.: Testing Adhesive Joints.pdf. Weinheim: John Wiley & Sons, 2012.
- [3] da SILVA L.F.M., ÖCHSNER A., ADAMS R.D., (ed.): Handbook of Adhesion Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] GODZIMIRSKI J., SMAL T., TKACZUK S., ROŚKOWICZ M., KOMOREK A.: GODZIMIRSKI\_Tworzywa adhezyjne Zastosowanie w naprawach sprzętu wojskowego.pdf. I. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2010.
- [5] GODZIMIRSKI J., TKACZUK S.: Określenie właściwości mechanicznych spoin klejowych.pdf. Technologia i Automatyzacja Montażu 2004, 95-97.
- [6] KUCZMASZEWSKI J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Wydawnictwa Uczelniane Lublin, 1995.
- [7] PN-EN ISO 604:2006 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy ściskaniu n.d.
- [8] PN-EN ISO 527-2:2012 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do prasowania, wtrysku i wytłaczania.
- [9] PN-EN ISO 527-3:1998 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Warunki badań folii i płyt.
- [10] PN-EN 15870:2009 – Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie połączeń czołowych.

## METHODS FOR DETERMINATION OF STRESS-STRAIN CURVES FOR ADHESIVES POLIMERS MATERIALS

**Summary:** To carry out the analytical and numerical calculations bonding joint bonding is necessary to know the mechanical properties of the used adhesives. Determination of stress-strain curves, provides information on the elastic modulus, yield strength, maximum displacement and data to perform analyzes for a range of plastic deformation. Methods for obtaining these data for the adhesives are different from the standard methods used for metals and plastics. The article compares the different methods of determining the stress-strain curves, indicating the advantages and disadvantages of allowing the researcher to choose the appropriate methods and interpret the results.

**Key words:** adhesive joints, adhesive, mechanical properties