

# Wzmacnianie elementów konstrukcji stalowych z wykorzystaniem taśm CFRP

## Strengthening of steel construction elements by CFRP tapes

DOI: 10.15199/33.2015.10.15

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** Wzmacnianie intensywnie eksploatowanych konstrukcji z użyciem nakładek wykonanych z taśm CFRP jest obecnie powszechnie stosowane w budownictwie mostowym. Efektywne ich wykorzystanie przedstawiono na przykładzie elementów pomostów (np. podłużnic) mostów kolejowych. Z uwagi na użycie kleju połączenie zaliczane jest do podatnych, co powoduje inną dystrybucję sił wewnętrznych we wzmacnianym elemencie niż w połączeniu idealnym, np. spawanym. Podczas badań analizowano parametry fizyczne materiałów kompozytowych używanych do wzmacniania konstrukcji (uzyskane jako wyniki analiz laboratoryjnych). Do oceny skuteczności wzmocnienia wykorzystano własny wskaźnik określający podatność połączenia klejowego. Analizy obliczeniowe uzupełniono badaniami belki walcowanej wzmocnionej taśmą z włókien węglowych.

**Słowa kluczowe:** wzmacnianie konstrukcji, mosty, kompozyty.

**Abstract.** Strengthening of old, intensively used structures by CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) overlays is common also in bridge maintenance. The article presents possibilities of their application due to old, steel bridge elements on example of longitudinal deck elements of railway bridges. Presented way of strengthening has also its limits. They are connected with connection susceptibility which causes different way of cooperation between beam and overlay as in case of a welded connection. Work tries to introduce the issue of physical features of composite materials as one of initial problem for real effectiveness of strengthening. It presents a summary of laboratory tests of these material composition. Second introduced question is rating of connection at field of susceptibility. This issue was considered on base of own laboratory tests of CFRP strengthened beam, which is a scale model of longitudinal railway bridge steel beam.

**Keywords:** strengthening of construction, bridges, composites.

Wzmacnianie konstrukcji z użyciem elementów doklepanych jest realizowane z powodzeniem zarówno w przypadku obiektów stalowych [3, 5, 6, 7], jak i betonowych [4]. Wykonywane jest przede wszystkim z uwagi na niewystarczającą nośność starej konstrukcji, występowanie elementów poddanych intensywnej degradacji (np. korozji stali) lub przeciążonych (np. zarysowanych belek z betonu zbrojonego lub sprężonego). Skutecznym zabiegiem wykonywanym z użyciem nakładek jest również poprawianie stateczności elementów ściskanych [7, 10]. Przewaga materiałów kompozytowych nad tradycyjnymi stosowanymi w budownictwie wynika z ich dużej wytrzymałości na rozciąganie i sztywności, możliwości uzyskania dużego odkształcenia granicznego, a także małego ciężaru własnego. Istotną zaletą stosowania nakładek z materiałów kompozytowych są pozytywne wrażenia estetyczne użytkowników obiektów [7, 11, 12].

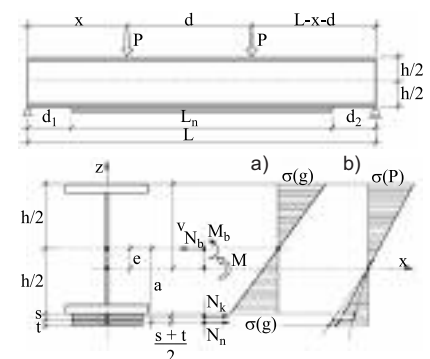
<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: marcin.wrzesinski@pwr.edu.pl

Podczas badań rozpatrywano efektywność wzmacniania elementów mostowych przy użyciu nakładek kompozytowych oraz połączenia klejowego [5, 8]. Połączenia te mają wiele zalet, do których zaliczyć należy m.in. łatwość wykonania, skuteczność oraz trwałość potwierdzoną wieloletnimi badaniami. Znane są również sposoby skutecznej ochrony przeciwpożarowej [6]. Badania dotyczyły podatności połączenia wzmacnianych zginanych elementów stalowych przy użyciu nakładki kompozytovej. Szczegółnej analizie cech fizycznych poddano wybrane dostępne materiały kompozytowe oraz różne rodzaje elementów wzmacnianych.

### Efektywność wzmocnienia

Na rysunku 1 przedstawiono podłużnicę mostu stalowego ze wzmocnieniem w postaci jednostronnej nakładki. W wyniku tego zabiegu technicznego zmienia ulega wykres naprężeń normalnych od zginania w analizowanym przekroju z nakładką. Od obciążenia stałego  $g$  powstają jednakowe wartości naprężeń na krawędzi dolnej i górnej belki dwuteowej, gdyż wzmacnianie odbywa się na istniejącym obiekcie z wyłączeniem obciążeń użytkowych. Są one „zamrożone” w istniejącej konstrukcji budowlanej. Po za-



**Rys. 1.** Wykres naprężeń w belce przed (a) i po (b) wzmocnieniu

Fig. 1. Graph of stress at bent beam cross-section, before (a) and after (b) strengthening

stosowaniu nakładki naprężenia od obciążenia ruchomego  $P$  będą mniejsze na krawędzi górnej, a jeszcze większy spadek nastąpi na krawędzi dolnej. W przypadku nośności elementu istotne znaczenie ma sumaryczna wartość naprężenia uzyskana od obciążenia  $g$  i  $P$  odniesiona do wytrzymałości stali. Rozważając początkowe, jednakowe wartości naprężeń na krawędzi górnej, otrzymuje się następujące zależności:

$$\bullet \text{ przed wzmocnieniem elementu} \\ \sigma = \frac{M(g)}{2J_b} h + \alpha_o \frac{M(P)}{2J_b} h \quad (1)$$

- po wzmocnieniu elementu

$$\sigma = \frac{M(g)}{2J_b} h + \alpha_w \frac{M(P)}{J_x} v \quad (2)$$

gdzie:

$M(g)$  – moment zginający od ciężaru własnego belki;

$J_b$  – moment bezwładności przekroju belki stalowej;

$M(P)$  – moment zginający powstały od obciążenia zewnętrznego;

$J_x$  – moment bezwładności przekroju po wzmocnieniu (bez zjawiska podatności połączenia);

$h$  – wysokość przekroju belki;

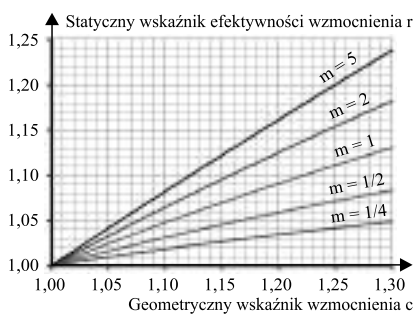
$v$  – odległość osi bezwładności przekroju wprowadzonego (trwale zespolonego) od skrajnych włókien przekroju;

$\alpha_w$  – mnożnik obciążenia identyfikowany z klasą obciążenia ruchomego.

Z porównania maksymalnych naprężeń normalnych powstałych od obciążeń zmiennych  $P$  jak we wzorach (1) i (2) otrzymuje się geometryczny wskaźnik wzmocnienia

$$c = \frac{\alpha_w}{\alpha_o} = \frac{J_x}{2J_b} \frac{h}{v} \quad (3)$$

W równaniu (3) przyjęto oznaczenia parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego belki jak na rysunku 1 oraz momenty bezwładności przy zginaniu:  $J_b$  – pierwotny,  $J_x$  – po wzmocnieniu. Analizy efektywności wzmocnienia omówiono szczegółowo w pracy [9], a wyniki badań przedstawiono na rysunku 2. Istotny wpływ na skuteczność wzmocnienia ma proporcja obciążeń stałych do zmiennych  $m = M(P)/M(g)$  widoczna w składnikach wyrażen (1) i (2).



**Rys. 2. Skuteczność wzmocnienia belki z zastosowaniem nakładki**

Fig. 2. Effectiveness of beam strengthening in case of overlay application

Z uwagi na cechy sprężyste materiałów stosowanych w analizowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym i sprowadzaniu ich charakterystyk do materiału podstawowego (stali), udział warstwy kleju w charakterystykach geometrycznych przekroju poprzecznego jest niewielki. Wynika to z bardzo małej wartości modułu sprężystości  $E_k$  wynoszącej 7 – 8 GPa.

## Cechy fizyczne taśmy i kleju

Materiały kompozytowe, do których można zaliczyć taśmę CFRP i klej, złożone są z matrycy (żywicy epoksydowej) oraz wypełniacza. Ze względu na rodzaj zbrojenia matrycy nazywane są materiałami włóknistymi lub z wypełniaczem cząsteczkowym (domieszką) [1]. W przeprowadzonych badaniach określono:

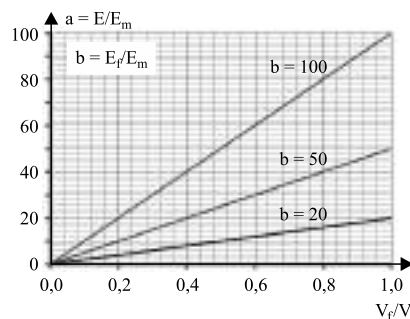
- udział ziaren/włókien w materiale kompozytowym;
- średnicę i kształt ziaren lub włókien;
- stan otaczania elementów zbrojących przez matrycę.

Wyniki pomiarów struktury wymienionych materiałów mają bezpośredni wpływ na ich parametry fizyczne, takie jak sztywność, wyrażoną modułem sprężystości podłużnej  $E$ , wytrzymałość oraz wartość maksymalnego odkształcenia względnego materiału kompozytowego. W przypadku materiału jednokierunkowo zbrojonego parametry te szacuje się na podstawie zasady mieszanin, zgodnie z którą cechy materiału wynikają bezpośrednio z procentowej zawartości składowych ( $V$ ): wypełniacza ( $f$ ) i matrycy ( $m$ ), co wyrażone jest wzorem

$$E = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m \quad (4)$$

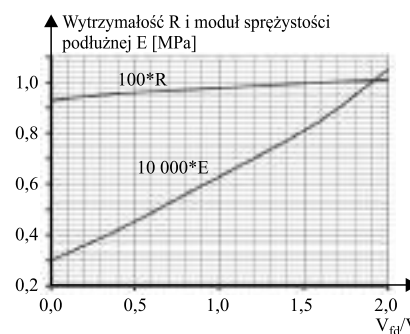
Na rysunku 3 przedstawiono wykres sztywności podłużnej gotowego materiału kompozytowego o zbrojeniu jednokierunkowym  $E$ , włóknistym w funkcji objętości wypełniacza  $V_f/V$ . Wzrost zbrojenia przekłada się bezpośrednio na zwiększenie udziału włókien w sztywności ogólnej, jak w (4). Równocześnie ze sztywnością zwiększa się wytrzymałość materiału włóknistego. Wartością graniczną zwiększania wytrzymałości jest wyczerpanie fizycznej możliwości otaczania włókien przez żywicę [1, 2]. Na rysunku 3 podano trzy proporcje sztywności włókna do sztywności matrycy  $b = E_f/E_m$ . W przypadku kompozytu na bazie żywicy jego sztywność wyraźnie wzrasta w miarę zwiększania względnego udziału domieszki (materiału ziarnistego) w objętości materiału kompozytowego  $V_{fd}/V$ . Nie jest on jednak tożsamy ze wzrostem wytrzymałości, jak na rysunku 4. Większy wzrost wytrzymałości uzyskuje się przez wprowadzenie wypełniacza włóknistych [1].

Analizy materiałów kompozytowych dokonano przy użyciu dwóch technik: badania wizualnego zglądu wykonanych próbek oraz oceny zawartości frakcji me-



**Rys. 3. Sztywność podłużna kompozytu włóknistego  $E$  w funkcji zawartości wypełniacza [2]**

Fig. 3. Longitudinal stiffness of fiber composite  $E$  in adhesive filler content [2]



**Rys. 4. Wytrzymałość  $R$  materiału kompozytowego na bazie żywicy i moduł sprężystości podłużnej  $E$  w funkcji względnej zawartości domieszki [1]**

Fig. 4. Strength  $R$  of composite and modulus of elasticity  $E$  in function of aggregate filler content [1]

todą wyżarzania (kalcynowania). Jako pierwsze przeprowadzono badanie mikroskopowe zglądów (tabela 1). Określono procentową zawartość pustek oraz matrycy w kleju epoksydowym. Analogicznie określono zawartość włókien w taśmie CFRP.

Udział składników w klejach systemowych określono metodą kalcynowania zgodnie z normą EN-ISO 1172 dotyczącą wyżarzania i oznaczenia gęstości kompozytu przez szacowanie masy. Ze względu na wzmocnienie kleju wypełniaczem mineralnym (krzemionką) nie

**Tabela 1. Procentowa zawartość składników w klejach systemowych oraz taśmie CFRP z pomiaru metodą zglądów**

Table 1. Content of ingredient at glue and CFRP tape composites by microsections method

Symbol materiału	Żywica (wypełniacz) [%]	Pustki [%]	Matryca [%]
Klej 1	80	7,5	12,5
Klej 2	67	11,8	21,2
Taśma CFRP [HM]	29		71

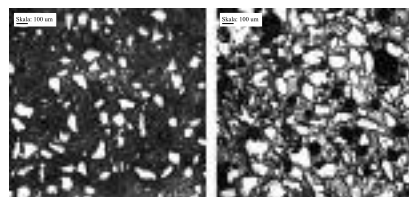
było obawy o zniszczenie ziaren podczas kalcynowania w podwyższonej temperaturze (powyżej 625°C). Kalcynowanie przeprowadzano we wcześniej nagrzanym do temperatury 625°C piecu mufowym i wyżarzano do uzyskania stabilnej masy. Ze względu na mały rozmiar próbek, ich czas przebywania w piecu wyniósł 1,5 h. Na podstawie proporcji masy przed oraz po badaniu oszacowano zawartość składników stałych, które zestawiono w tabeli 2.

**Tabela 2. Procentowa zawartość składników w klejach systemowych z pomiaru metodą kalcynowania**

Table 2. Content of ingredient at glue composite by calcination method

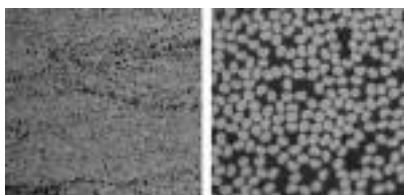
Symbol materiału	Żywica (wypełniacz z pustkami) [%]	Matryca [%]
Klej 1	31,21	68,79
Klej 2	30,19	69,81

Na podstawie obserwacji mikroskopowych (fotografia 1) zglądów próbek oszacowano średnie wymiary (największy/najmniejszy) ziaren wypełniacza kwarcowego w kierunkach prostopadłych. W przypadku kleju systemowego nr 1 wynosiły one 228/143 μm, kleju nr 2 – 172/114 μm. Mają więc zbliżoną proporcję (wymiar krótszy stanowi 50–60% wymiaru dłuższego). Rozmiar ziaren pozwala na określenie prawdopodobnej frakcji wypełniacza kwarcowego jako piaskowej (psamitowej) 0,063 – 2,0 mm, a dokładniej piasku drobnego (wielkość ziaren do 0,2 mm wg PN-ISO 14688-2 lub 0,25 mm wg PN-86/02480). Wartość średnia zmierzonej średnicy włókien węglowych wynosiła 8 μm i zgodnie z [6] była typowa (5–8 μm) jak w przypadku materiałów produkowanych z materiałów PAN (poliakrylonitrile). Dane uzyskane podczas pomiarów laboratoryjnych (fotografia 2) pozwalają potwierdzić opisane przez producentów cechy klejów systemowych oraz taśmy CFRP użytych do analiz. Zmierzona zawartość wypełniaczy ziarnistych, a także włókien węglowych o podwyższonej sztywno-



**Fot. 1. Mikroskopowy obraz próbek klejów systemowych przy powiększeniu 5x: a) klej 1; b) klej 2**

Photo 1. Microscopic of connection glues section at a magnification of 5x: a) glue no. 1; b) glue no. 2



**Fot. 2. Mikroskopowy obraz próbek taśmy CFRP (typu High Modulus), przy powiększeniu: a) 5x; b) 50x**

Fig. 2. Microscopic observation of CFRP tape section (High Modulus type) at a magnification of 5x and 50x

ści (typ HM) oraz wyniki analiz przeprowadzonych przy użyciu teorii mieszanin są zbliżone z danymi literaturowymi.

## Skuteczność połączenia klejowego

Cechy fizyczne kleju stosowanego do łączenia stali z taśmami powodują, że połączenia wykonane przy ich użyciu traktuje się jako podatne. Do analiz skuteczności (podatności) połączenia w elementach zginanych zastosowano bezwymiarowy wskaźnik  $\mu$  [8] określany wzorem

$$\mu = \frac{a \cdot N_b}{M_b} = \frac{a \cdot e \cdot A_b}{J_b} \quad (5)$$

gdzie:

$N_b$  – siła osiowa w belce;

$J_b$  – moment bezwładności przekroju belki stalowej;

$M_b$  – moment zginający w belce powstały od obciążenia zewnętrznego;

$a$  – odległość między osiami bezwładności elementów składowych;

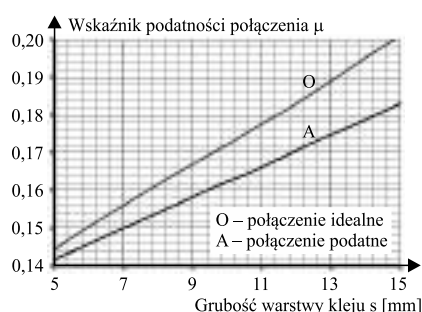
$e$  – względna zmiana położenia osi bezwładności;

$A_b$  – pole przekroju poprzecznego belki stalowej.

Jego wartość wyznaczana jest z powodzeniem w badaniach elementów zespolonych z zastosowaniem podatnych połączeń, np. z użyciem łączników sworzniowych [4]. Do jego określenia z formuły geometrycznej niezbędne jest wyznaczenie zmiany położenia osi bezwładności przekroju wzmocnionego  $e$ , jak na rysunku 1.

W badaniach wytrzymałościowych zastosowano dwuteownik walcowany IPE 100 jako element konstrukcji stalowej:  $h = 10$  cm,  $A_b = 26$  cm<sup>2</sup>,  $J_b = 450$  cm<sup>4</sup>,  $L = 1,0$  m. Nakładkę o grubości  $t = 1,4$  mm i długości  $0,7L$  wykonano z taśmy CFRP typu HM o wysokiej wartości modułu sprężystości podłużnej ( $E = 256$  GPa), jak na rysunku 1. Zasadniczym elementem analizy wzmocnienia był sposób połączenia przy użyciu kleju systemowego (klej nr 1). W celu oceny wpływu grubości kleju na skuteczność połączenia przeprowadzono badania [9], w których średnia grubość warstwy kleju wynosiła:  $s(1) = 5,6$  mm;  $s(2) = 10,7$  mm i  $s(3) = 13,8$  mm. Każdej

z nich odpowiada inna wartość wskaźnika  $\mu_o(1) = 0,148$ ;  $\mu_o(2) = 0,176$ ;  $\mu_o(3) = 0,194$ , co pokazuje rysunek 5.



**Rys. 5. Wskaźniki podatności połączenia w zależności od grubości warstwy kleju s**

Fig. 5. Susceptibility factor of connection depending on the thickness of the adhesive s

## Podsumowanie

Wzmocnienie elementów zginanych przy użyciu nakładek wykonanych z taśm CFRP jest skutecznym rozwiązaniem technicznym w przypadku belek o małej wysokości, jak w podłużnicach mostów stalowych. Skuteczność wzmocnienia jest większa, gdy udział obciążeń zmiennych istotnie przeważa nad obciążeniami stałymi. Wyniki badań laboratoryjnych elementów wzmocnianych z użyciem połączeń klejowych wykazują ich podatność. W związku z tym zaproponowano analizę tego zjawiska z użyciem wskaźnika podatności połączenia. Umożliwia on obserwowanie podatności połączenia pod obciążeniami stałymi i zmieniającymi położenie, czego przykładem są elementy stalowych pomostów obiektów kolejowych.

Wyniki badań wytrzymałościowych wzmocnionych elementów stalowych wskazują na zmienność cech zastosowanego połączenia. Dowodzą, że mimo występowania stałych sił przekrojowych współpraca elementów nakładki i belki nie jest równomierna [9, 11, 12] oraz że zmienia się zasadniczo w przypadku zmiany grubości łącznika klejowego. Opisana parametrem  $\mu$  podatność połączenia rośnie proporcjonalnie do wzrostu grubości zastosowanego łącznika. Wskaźnik stosowany jest najczęściej do opisu konstrukcji zespolonych stal-beton, w których rolę łącznika stanowią dyble stalowe zagłębione w betonie [5, 8]. Wykorzystanie go do opisu konstrukcji stalowej, wzmocnianej nakładką kompozytową, służy rozszerzeniu zakresu stosowania tego typu opisu konstrukcji. Badania przeprowadzono w laboratoriach





Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej oraz Katedry Mostów i Kolei Politechniki Wrocławskiej.



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

#### Literatura

- [1] Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pielichowski J.: Chemia i technologia żywic epoksydowych, WNT Warszawa 2002 r.  
[2] German J.: Podstawy mechaniki materiałów włóknistych, Kraków 1996 r.

[3] Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Existing Structures. Metallic Structures. Rome CNR-DT 202/2007.

[4] Jankowiak I., Madaj A.: Analiza numeryczna wzmocnienia taśmami CFRP betonu rozciąganego stalowo-betonowej belki zespolonej. X Konf. Konstrukcje zespolone, Zielona Góra 26-27 czerwca 2014 r.

[5] Kuczma B., Kuczma M.: Klejone stalowo-betonowe belki zespolone, Mosty 5/2012 r.

[6] Łagoda M.: Wzmocnianie mostów przez doklejanie elementów, Seria Inżynieria Lądowa, Monografia 322, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.

[7] Łagoda M., Kowal M.: Wzmocnianie konstrukcji stalowych materiałami kompozytowymi. Materiały Budowlane Nr 4/2011.

[8] Machelski C., Toczkievicz R.: Identyfikacja podatności połączenia w dźwigarach mostów ze-

spolonych. Efekty obciążeń zmieniających położenie. Mosty Nr 6/2011.

[9] Machelski C., Wrzesiński M.: CFRP Strengthening of Deck Beams in Railway Steel Bridges, SBIC 2015, September 14 – 16<sup>th</sup>, 2015, Istanbul, p. 737 – 746.

[10] Marcinowski J., Iwankiewicz R.: Zastosowanie okładek włókno kompozytowych do zwiększenia odporności na wyboczenie prętów. X Konf. Konstrukcje zespolone, Zielona Góra, 26-27 czerwca 2014.

[11] Wrzesiński M.: Badania nad wzmocnieniem elementów starych mostów. Kooper-field 2014, wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014 r.

[12] Wrzesiński M.: Wzmocnienia starych mostów stalowych przy użyciu CFRP. Kooper-field 2012, wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012 r.

Przyjęto do druku: 24.08.2015 r.

dr inż. Piotr Mackiewicz<sup>1)</sup>

# Parametry materiałowe mieszanek mineralno-asfaltowych w badaniu statycznym i dynamicznym

## *Material parameters of asphalt mixtures identified in static and dynamic tests*

DOI: 10.15199/33.2015.10.16

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono procedurę określania lepkosprężystych cech materiałowych uzależnionych od temperatury oraz warunków obciążenia. Analizie poddano statyczne badanie pełzania oraz badanie dynamiczne (o częstotliwości 10 Hz) oparte na schemacie belki czteropunktowej (4BP). Na podstawie tych badań określono parametry lepkosprężyste modelu Burgersa. W obu przypadkach uzyskano podobną ich zmienność od temperatury, jednak różne wartości bezwzględne. Wykazano, że parametry lepkosprężyste są uzależnione istotnie od czasu trwania obciążenia i temperatury. Stwierdzono, że w przypadku badań statycznych o długotrwałym obciążeniu parametry te należy określać z krzywych pełzania, natomiast badań dynamicznych z histerezy. Badania pełzania pod obciążeniem statycznym oraz dynamiczne 4BP stanowią skuteczną metodę określania parametrów reologicznych materiałów stosowanych w nawierzchniach drogowych.

**Słowa kluczowe:** parametry lepkosprężyste, badanie pełzania, badanie zmęczeniowe, mieszanka mineralno-asfaltowa, model Burgersa, belka czteropunktowo zginana.

**Abstract.** In the manuscript, a procedure of identification of viscoelastic material features in dependence on temperature and load conditions was described. The subject of the study were static creep and dynamic tests (with the frequency of 10 Hz) based on four point bending beam (4BP). As a result of these studies, viscoelastic parameters for the Burgers' model were determined. Similar variation of parameters in dependence on temperature was found for two test but different absolute values were obtained. It was shown that these parameters depend significantly on the load time and temperature. We also found that the parameters should be determined using a creep curve for static analyses with persistent load, whereas in the case of dynamic studies – using a hysteresis. Procedures for these studies were described in details. The 4BP static creep and dynamic tests are sufficient methods determining rheological parameters for materials devoted to flexible pavements.

**Keywords:** Viscoelastic parameters, Creep Test, Fatigue tests, Asphalt mixes, Burgers model, four point bending beam.

Określenie miarodajnych cech materiałowych jest kluczowe w analizach konstrukcji. Odpowiednie parametry materia-

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; e-mail: piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

łowe oraz dobrany model pozwalają na skuteczne wykorzystanie metod numerycznych pozwalających następnie wyznaczyć m.in. stan naprężeń i odkształceń w analizowanym modelu konstrukcji. W przypadku mieszanek mineralno-asfal-

towych stosowanych jako główny materiał w budowie podatnych nawierzchni drogowych jest to szczególnie istotne, gdyż są one materiałem termoplastycznym zmieniającym właściwości w zależności od warunków termicznych. W różnych warun-