

## TENSEGRITY W KONSTRUKCJACH MOSTOWYCH

Wojciech Gilewski, Andrzej Kasprzak

Politechnika Warszawska w Warszawie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat zastosowania konstrukcji tensegrity w projektowaniu mostów i kładek dla pieszych. W ostatnich kilku latach pojawiają się nowe projekty i realizacje konstrukcji tego typu. Do najważniejszych jej zalet należy zaliczyć lekkość i możliwość samodiagnozowania i samonaprawy. Ocena literatury wskazuje, że w najbliższym czasie należy spodziewać się nowych projektów i aplikacji inteligentnych mostów i kładek dla pieszych tensegrity.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje tensegrity, projektowanie mostów

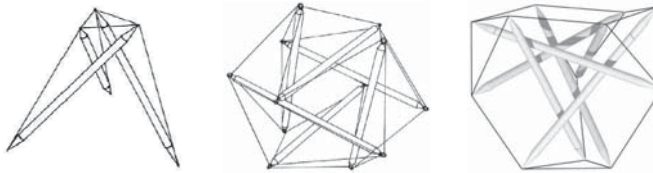
### WSTĘP

Lekkie konstrukcje w budownictwie stanowią od dawna wyzwanie dla projektantów i konstruktorów. Konstrukcjami, które można zakwalifikować do ultralekkich, są znane od kilkudziesięciu lat tensegrity. Jednak dopiero w ostatnich kilkunastu latach obserwujemy zainteresowanie tensegritami jako konstrukcjami nośnymi w mostach i kładkach dla pieszych. Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie stanu realizacji inżynierskich w tej dziedzinie oraz wskazanie perspektyw rozwojowych i badawczych.

### KONCEPCJA TENSEGRITY

Idea konstrukcji typu tensegrity sięga pierwszej połowy XX wieku. Jej autorstwo przypisuje się Richardowi Buckminster-Fullerowi i Kennethowi Snelsonowi [Motro 2003, Skelton i de Oliveira 2009]. Mimo upływu lat nie ma jednej uniwersalnej definicji konstrukcji tensegrity. Wynika to z faktu, że konstrukcja ta pierwotnie stosowana częściej w rzeźbiarskich prototypach niż w rzeczywistych obiektach, z upływem czasu musiała być modyfikowana tak, aby mogła spełniać wymogi realnych konstrukcji inżynierskich. Jedna z definicji wypracowana przez Motro [2003] określa konstrukcje typu tensegrity jako samonośne, złożone z nieciągniętego układu elementów ściskanych, wewnątrz ciągniętego układu elementów rozciąganych. Szttywność konstrukcji, niezależna

od obciążeń zewnętrznych (również siły ciężkości), jest zapewniana przez naprężenia ściskające i rozciągające w elementach konstrukcyjnych, spowodowane wstępnym sprężeniem konstrukcji. Elementy ściskane i rozciągane, a tylko takie mogą znajdować się w konstrukcji, rozmieszczone w postaci przestrzennej siatki, wzajemnie stabilizują się. Istniejące rozbieżności mogą prowadzić do nieporozumień i dotyczą kwestii pochodzących z pierwszych definicji, które można znaleźć we wnioskach patentowych Fullera i Snelsona. Restrykcyjne wymogi dotyczą kwestii takich, jak ograniczenie kształtu elementów ściskanych do prostych prętów jednakowych wymiarów czy zakazu stykania się elementów ściskanych w węzle. We współczesnych definicjach rezygnuje się z tych ograniczeń [Skelton i de Oliveira 2009]. Przykładowe konstrukcje tensegrity przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe konstrukcje tensegrity [Skelton i de Oliveira 2009]  
 Fig. 1. Examples of tensegrity structures [Skelton and de Oliveira 2009]

Richard Fuller określał konstrukcje tensegrity jako „wyspy ściskania wewnątrz oceanu rozciągania”. Dzięki eliminacji zginania elementów konstrukcyjnych i dominacji sił rozciągających konstrukcje tego typu mogą być bardzo lekkie. Między innymi dlatego w ostatnich latach w inżynierii lądowej nastąpił wzrost zainteresowania konstrukcjami typu tensegrity. Możliwość zastosowania tego typu konstrukcji w rozwiązaniach inżynierskich jest spowodowana takimi czynnikami, jak rozwój technik komputerowych czy rozwój technologii materiałowej. Zastosowanie komputerowych metod obliczeniowych umożliwia projektowanie konstrukcji o bardzo skomplikowanej geometrii i nieliniowym zachowaniu, natomiast wytwarzanie stali o dużej wytrzymałości i małej relaksacji ułatwia projektowanie sprężonych konstrukcji ciągnowych, jakimi są konstrukcje typu tensegrity. Jednym z obszarów, w których wdraża się konstrukcje tego typu, jest mostownictwo.

Literatura przedmiotu jest bardzo bogata – wymienimy jedynie fundamentalną pracę dotyczącą mechaniki tensegritów Murakami [2001a, b] i opracowania monograficzne Motro [2003] oraz Skelton i de Oliveira [2009]. Istotną cechą tensegritów jest możliwość ich aktywnej samodiagnozy i samonaprawiania (por. Adam i Smith [2007]).

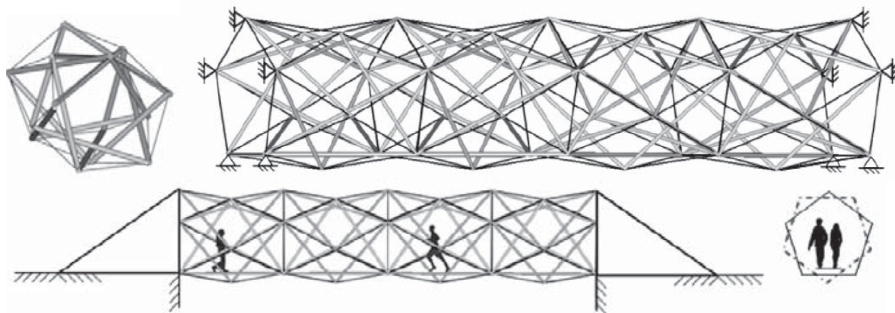
## TENSEGRITY W KONSTRUKCJACH MOSTOWYCH

Ze względu na funkcję obiektów mostowych i ich sposób pracy tworzenie obiektów mostowych typu tensegrity nie jest łatwe. Trudności związane są z małą masą konstrukcji, możliwością wystąpienia dużych przemieszczeń i rozwiązaniem zagadnień wykonawczych. Konieczne jest także zapewnienie funkcjonalności obiektu poprzez utworzenie pomostu, co wychodzi poza typowy – prętowy obraz konstrukcji typu tensegrity. W pomoście

w sposób naturalny występuje zginanie, jednak, podobnie jak w przypadku kratownic, pomost może stanowić element pracujący jedynie lokalnie, który ma na celu przeniesić siły do węzłów właściwej konstrukcji, nie wywołując w niej sił zginających. Pomimo wspomnianych trudności podejmuje się próby projektowania i budowy obiektów mostowych typu tensegrity. Ze względu na dużo mniejsze obciążenia niż w przypadku obiektów drogowych i kolejowych rozważania dotyczą przede wszystkim kładek dla pieszych lub kładek pieszo-rowerowych.

Przedstawimy niektóre z projektów konstrukcji typu tensegrity lub konstrukcji inspirowanych tymi konstrukcjami. Pierwszą grupą będą obiekty tworzone poprzez połączenie ze sobą elementarnych, łączonych przestrzennie modułów. We wszystkich przedstawionych przykładach istnieje konieczność zapewnienia skrajni ruchu w przestrzeni wewnątrz modułów.

Jedną z konstrukcji tego typu przedstawiono w pracy Rhode-Barbarigos i innych [2010]. Rozpiętość teoretyczna kładki wynosi tam 20 m, a skrajnia w obiekcie ma wymiary  $1,3 \times 2,5$  m. Jest to stalowy obiekt, który spełnia szeroką definicję konstrukcji typu tensegrity. Pomost, podparty w węzłach na końcach modułów, nie jest głównym elementem konstrukcyjnym. W konstrukcji zastosowano więcej niż minimum potrzebnych prętów ściskanych. Można sobie wyobrazić, że bez dłuższych prętów moduł również byłby stateczny, choć należy podejrzewać, że dodatkowe elementy ściskane zostały zastosowane ze względów konstrukcyjno-użytkowych (rys. 2).

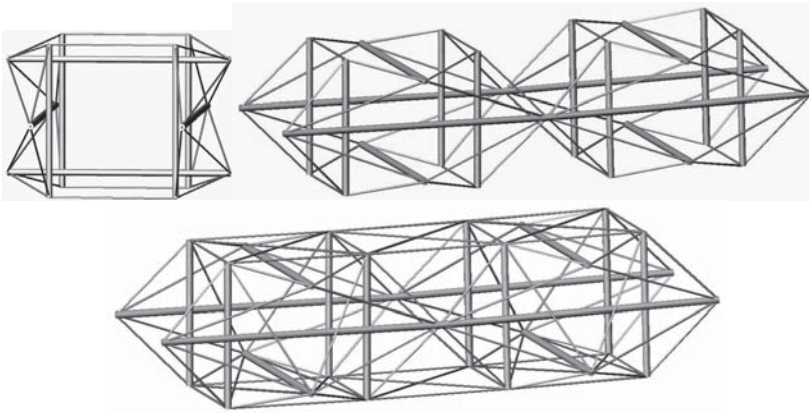


Rys. 2. Moduł, widok aksonometryczny i widok z boku kładki tensegrity [Rhode-Barbarigos i in. 2010]

Fig. 2. Module, axonometric view and side view of tensegrity footbridge [Rhode-Barbarigos at al. 2010]

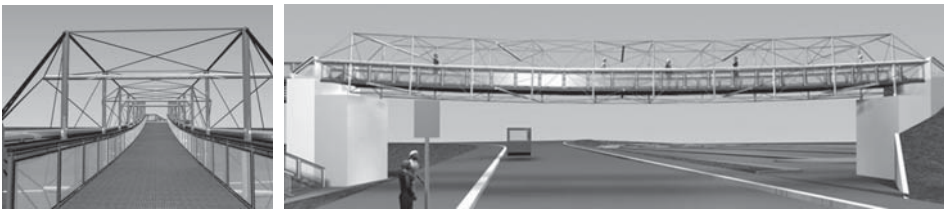
Do tej samej grupy obiektów należy zakwalifikować projekt autorstwa Andrei Michalletti [2005]. Stalowa kładka została zaprojektowana do wykonania w pobliżu Uniwersytetu Tor Vergata w Rzymie (rys. 3 i 4). Rozpiętość teoretyczna tej jednoprzęsłowej kładki wynosi 32 m. Podobnie jak w przypadku szwajcarskiego projektu, moduły musiały zostać wzmocnione – tym razem za pomocą dodatkowych cięgien.

Inne przykłady projektów konstrukcji tego typu, opisane w literaturze, to koncepcja modularnej kładki autorstwa Gomeza Jauregui (rys. 5) oraz odbiegająca od dotychczasowych przykładów koncepcja obiektu mostowego o przekroju owalnym autorstwa Andreasa Kirchsteigera (rys. 6). Jest to stalowy obiekt złożony z cięgien sprężających i owalnych stalowych elementów ściskanych, wzmocniony naprężonymi pasami z kewlaru.



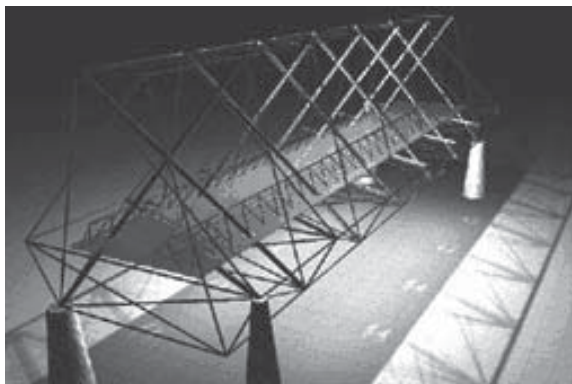
Rys. 3. Moduł pojedynczy, dwa połączone moduły i wzmocnienie dodatkowymi cięgnami zastosowane w projekcie kładki Tor Vergata [Michaletti 2005]

Fig. 3. Single module, two modules and additional tension member reinforcement used in the project of Tor Vergata footbridge [Michaletti 2005]



Rys. 4. Wizualizacja kładki Tor Vergata [Michaletti 2005]

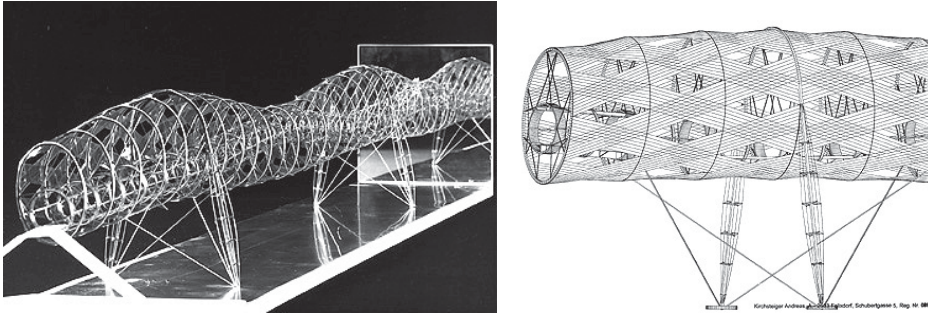
Fig. 4. Visualization of Tor Vergata footbridge [Michaletti 2005]



Rys. 5. Wizualizacja koncepcji kładki typu tensegrity [Jauregui 2004]

Fig. 5. Visualization of the concept of tensegrity footbridge [Jauregui 2004]

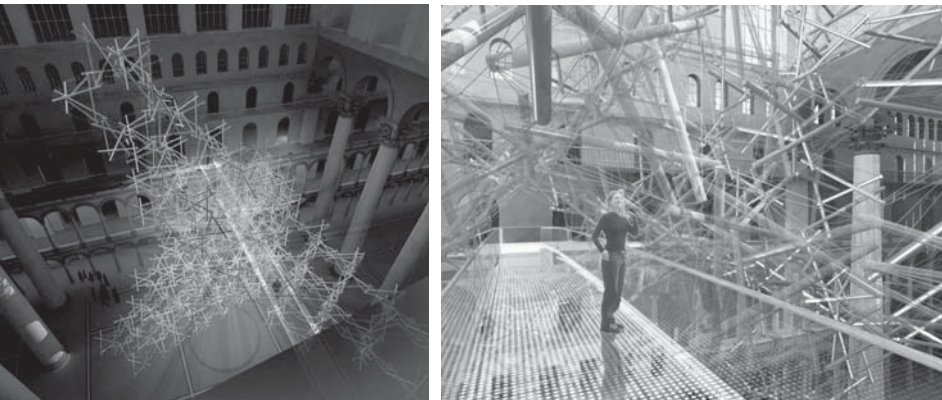




Rys. 6. Makieta obiektu mostowego typu tensegrity wzmocnionego pasami z kewlaru [Jauregui 2004]

Fig. 6. Model of tensegrity bridge reinforced by kevlar strips [Jauregui 2004]

Oddzielnie należy rozpatrywać projekt kładki dla pieszych opracowany przez biuro architektoniczne Wilkinson Eyre Architects we współpracy z biurem projektowym Arup, zaproponowany do budynku Muzeum Narodowego w Waszyngtonie (rys. 7). Strukturę konstrukcji również stanowią proste, połączone moduły tensegrity, jednak tym razem są one usytuowane przestrzennie, w nieuporządkowanej formie. Wydaje się, że funkcja komunikacyjna jest tu drugorzędna, a konstrukcja ma bardziej rzeźbiarski charakter. Elementy ściskane stanowią szklane rury, które dźwiękiem i podświetleniem miałyby reagować na zmianę sił wewnętrznych w konstrukcji.

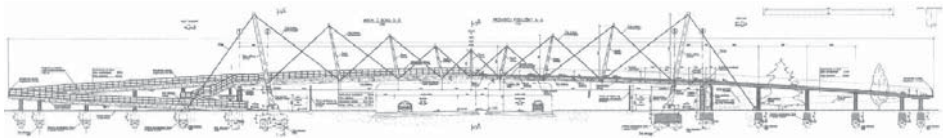


Rys. 7. Wizualizacja kładki w budynku Muzeum Narodowego w Waszyngtonie [www.wilkinsoneyre.com]

Fig. 7. Visualization of footbridge in National Museum in Washington [www.wilkinsoneyre.com]

Kolejna grupa konstrukcji została wyodrębniona pod wpływem projektu pierwszego w Polsce obiektu mostowego typu tensegrity [Markocki i Oleszek 2011]. Projekt autorstwa Bogusława Markockiego dotyczy kładki KL-03 nad trasą S-7 Salomea – Wolnica (rys. 8). Jest to konstrukcja trójprzęsłowa, stalowa, z pomostem zespolonym żelbetowo-stalowym, o rozpiętości głównego przęsła wynoszącej 67,2 m. Projektowany pomost

opiera się na dwóch dźwigarach rurowych, stężonych poprzecznie. Całość jest podwieszona do konstrukcji ciągnowo-prętowej, złożonej ze sztywnych słupków stalowych, pylonów i cięgien podwieszenia. Autorzy projektu nie kryją inspiracji inną konstrukcją podobnego typu, a mianowicie kładką Forthside Bridge w Sterling w Szkocji (rys. 9) – Brownlie i inni [2008]. Przypatrując się obu obiektom, można odnieść wrażenie, że nie są to konstrukcje, które spełniają w pełni kryteria tensegrity. W polskiej kładce fragment konstrukcji powyżej pomostu przypomina kratownicę ciągnowo-prętową, usztywniającą cały obiekt, a wspornikowa metoda budowy i sam kształt konstrukcji przywodzą na myśl typowe założenia konstrukcji podwieszanej. Pomost odgrywa tu wyraźną rolę konstrukcyjną, przenosząc m.in. siły zginające. Trudno uznać to za zarzut w odniesieniu do konstrukcji mostowych. Ze względu na funkcję obiektu, jeśli pomost nie miałby jedynie opierać się w węzłach konstrukcji nośnej, a pełnić również rolę jednego z elementów ściskanych, to występowanie w nim sił zginających jest nieuniknione. Z drugiej strony stalowe słupki zostały połączone z dźwigarami pomostu w sposób sztywny – choć samo połączenie, przekroje oraz kształt konstrukcji podwieszenia wskazują na znikomą rolę sił zginających w elementach prętowych, to stoi to w pewnej sprzeczności z definicją René Motro, mówiącej o nieciągłym układzie elementów ściskanych wewnątrz ciągłego układu elementów rozciąganych. Należy też zwrócić uwagę na podobieństwo ustroju nośnego do ustrojów kratownicowych ze względu na dwuwymiarowość konstrukcji podwieszenia.



Rys. 8. Projekt kładki nad Trasą S-7 [Markocki i Oleszek 2011]

Fig. 8. Project of footbridge over the S-7 Motorway [Markocki and Oleszek 2011]



Rys. 9. Kładka Forthside Bridge w Sterling [Brownlie i in. 2008]

Fig. 9. Forthside Footbridge in Sterling [Brownlie et al. 2008]

Niezależnie od wątpliwości, oba obiekty należy uznać za konstrukcje bardzo ciekawe i nawet jeśli miałyby one nie spełniać całkowicie założeń dotyczących konstrukcji typu tensegrity, to bez wątpienia idea ta jest w nich widoczna. Kładki należące do tej grupy można zatem nazwać wielopylonowymi lub wielosłupkowymi podwieszonymi obiektami mostowymi opartymi na zasadach konstrukcji typu tensegrity.

Należy dodać, że istnieją również inne obiekty należące do tej grupy, które niekoniecznie są opisywane w kontekście konstrukcji tensegrity. Przykładem mogą być dwie ładki – Almare Bridge w Holandii oraz Royal Victoria Dock Bridge (rys. 10).



Rys. 10. Almare Bridge i Royal Victoria Dock Bridge  
Fig. 10. Almare Bridge and Royal Victoria Dock Bridge

Inną wyodrębnioną w pracy kategorią mostów są obiekty, które można uznać za samodzielne konstrukcje typu tensegrity. W takim przypadku ruch pieszych lub pojazdów odbywa się po pomoście, który jest jednocześnie jednym ze ściskanych elementów konstrukcyjnych. Taki pomost może być w całości podwieszony – niestykający się z innymi elementami ściskanymi, lub też może się opierać na podwieszonych elementach ściskanych. Inspiracją do rozważań nad takimi obiektami mogą być konstrukcje tensegrity zaproponowane przez Kennetha Snelsona (rys. 11). Pionowe pręty ściskane mogą być zamocowane podobnie jak pylony mostów podwieszonych. Pręty poziome spełniają w takim przypadku funkcje pomostu. Ponieważ brak jest dostępnych w literaturze projektów tego typu, trudno więc określić praktyczność takiego rozwiązania. Wiadomo jednak, że należałoby sprostać problemom typowym dla konstrukcji tensegrity, takim jak duże przemieszczenia pod obciążeniami zmiennymi.



Rys. 11. Konstrukcje typu tensegrity możliwe do wykorzystania w mostownictwie [Skelton i de Oliveira 2009]

Fig. 11. Tensegrity structures to be used in bridge design [Skelton and de Oliveira 2009]

Na koniec warto przyjrzeć się najbardziej spektakularnej z wybudowanych dotąd mostowych konstrukcji typu tensegrity. Chodzi tu o otwartą w 2009 roku kładkę Kurilpa Bridge w Brisbane w Australii (rys. 12) zaprojektowaną przez biuro architektoniczne Cox Rayner Architectst oraz biuro projektowe Arup. Jest to stalowa kładka pieszo-rowerowa nad rzeką Brisbane. Rozpiętość teoretyczna przęsła nurtowego wynosi 128 m, a całkowita długość obiektu – 470 m. Na stalowej konstrukcji pomostu spoczywają płyty żelbetowe. Próba zakwalifikowania tej konstrukcji do jednej z wcześniej przedstawionych kategorii nie jest oczywista.



Rys. 12. Kurilpa Bridge: a – widok z boku, b – widok z góry  
Fig. 12. Kurilpa Bridge: a – side view, b – top view

Konstrukcja podwieszenia zawiera elementy typowe dla układów tensegrity. Uwagę zwracają poziome pręty ściskane podwieszane między górną krawędzią ustroju nośnego a pomostem. Są one bardzo charakterystyczne dla konstrukcji tensegrity i zapewniają rozparcie pionowych cięgien rozciąganych. Układ elementów wskazuje na przestrzenny charakter pracy całej konstrukcji. Z drugiej strony trudno oprzeć się wrażeniu podobieństwa Kurilpa Bridge do kładek z drugiej z przedstawionych grup (Forthside, KL-03), szczególnie jeśli przyjrzeć się sposobie ich budowy. Wznoszenie obiektów w sposób wspornikowy – podwieszając fragmenty pomostu do kolejno ustawianych słupków – daje pojęcie o podobnej pracy wymienionych konstrukcji. Jednak w przypadku Kurilpa Bridge nie zaprojektowano pylonów przechodzących przez pomost, a wszystkie pionowe elementy ściskane połączone są z pomostem w sposób przegubowy, co sprawia, że konstrukcję podwieszenia można zakwalifikować do samodzielnych konstrukcji typu tensegrity.

Kurilpa Bridge jest największym obiektem mostowym typu tensegrity na świecie. Konstrukcja wzbudza wiele kontrowersji, m.in. ze względu na swoje cechy architektoniczne – dość chaotyczny wygląd oraz wysoki koszt budowy. Bez wątpienia jest to obiekt wyjątkowy, bardzo ciekawy i oparty na idei tensegrity.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono i scharakteryzowano konstrukcje mostowe oparte na koncepcji tensegrity. Projekty i realizacje konstrukcyjne tego typu pojawiają się od kilku lat. Cechą konstrukcji tensegrity jest ich lekkość. Wydaje się jednak, że największą zaletą mostów



i kładek dla pieszych opartych na zasadach tensegrity jest możliwość ich samodiagnozowania i ewentualnej samonaprawy, co może je klasyfikować jako konstrukcje inteligentne. Intensywne badania nad inteligentnymi konstrukcjami inżynierskimi typu tensegrity trwają i w najbliższych latach należy oczekiwać nowych ciekawych realizacji.

## PIŚMIENNICTWO

- Adam B., Smith I.F.C., 2007. Self-diagnosis and self-repair of an active tensegrity structure. *J. Structural Engineering* 133, 1752–1761.
- Brownlie K., Curran P., Thompson S., 2008. Forthside bridge. 3<sup>rd</sup> International Conference on Footbridge, Stirling, Scotland.
- Jauregui V.G., 2004. Tensegrity structures and their application to architecture. M. Sc. Thesis, Queen's University, Belfast.
- Markocki B., Oleszek R., 2011. Konstrukcje tensegrity w zastosowaniu mostowym na przykładzie koncepcji kładki KL-03 nad trasą S-7 Salomea – Wolica. VII Krajowa Konferencja „Estetyka mostów”, Jachranka.
- Michaletti A., 2005. Modular tensegrity structures: the Tor Vergata footbridge. *Proceedings of the 2nd International Conference on Footbridges*. Venice, Italy.
- Motro R., 2003. Tensegrity structural systems for the future. Kogan Page, London.
- Murakami H., 2001a. Static and dynamic analyses of tensegrity structures. Part I. Nonlinear equations of motion. *International Journal of Solids and Structures* 38, 3599–3613.
- Murakami H., 2001b. Static and dynamic analyses of tensegrity structures. Part II. Quasi-static analysis. *International Journal of Solids and Structures* 38, 3615–3629.
- Rhode-Barbarigos L., Bel Hadj Ali N., Motro R., Smith I.F.C., 2010. Designing tensegrity modules for pedestrian bridges. *Engineering Structures* 32, 1158–1167.
- Skelton R.E., de Oliveira M.C., 2009. Tensegrity systems. Springer, London.

## TENSEGRITIES IN BRIDGE STRUCTURES

**Abstract.** The present paper is dedicated to state-of-the-art of engineering applications of tensegrity structures for bridges and footbridges. New projects and practical realizations can be observed recently. The main advantage of the tensegrity structures is its light weight and possibility of self-diagnosis and self-repair. Some new projects and applications in the field of smart tensegrity bridges and footbridges are expected in the nearest future.

**Key words:** tensegrity structures, bridge design

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.09.2011