

TOMASZ SIWOWSKI¹⁾

DROGOWE MOSTY ALUMINIOWE - WCZORAJ, DZIŚ I JUTRO

STRESZCZENIE. Stopy aluminium jako materiał do budowy mostów stosuje się od 1933 r. W czasie ponad 70 lat wybudowano kilkadziesiąt różnego rodzaju aluminiowych mostów drogowych, głównie w USA, Skandynawii i Holandii. Powodem stosowania stopów aluminium w mostach są takie zalety stopów, jak wysoka trwałość, mały ciężar, duże możliwości kształtowania konstrukcyjnego, formowalność, łatwość wytwarzania i transportu elementów, recykling, itp. Współczesny postęp inżynierii materiałowej doprowadził do powstania nowej generacji stopów aluminiowych o bardzo dobrych cechach wytrzymałościowych oraz o podwyższonej trwałości. Pozwoliło to na szersze zastosowanie tego materiału m.in. w budownictwie komunikacyjnym. Obecnie można wyróżnić kilka obszarów mostownictwa, w których stopy aluminium znajdują zastosowanie. Są to m.in.: pomosty aluminiowe do modernizacji mostów istniejących, mosty wojskowe, kładki dla pieszych oraz przęsła mostów drogowych. Ten ostatni obszar zastosowań stopów aluminium w mostownictwie jest przedmiotem artykułu, w którym przedstawiono historię, współczesność oraz perspektywy drogowych mostów aluminiowych.

1. WSTĘP

W celu zwiększenia trwałości obiektów mostowych i przedłużenia ich przydatności eksploatacyjnej prowadzi się obecnie rozległe poszukiwania nowych tworzyw, które mogłyby być stosowane w zastępstwie betonu i stali. Znane są już powszechnie zastosowania materiałów kompozytowych z włóknami węglowymi, szklanymi i aramidowymi do budowy i wzmacniania mostów. Obok kompozytów zauważalny jest również

¹⁾ dr inż. - adiunkt, Katedra Mostów, Politechnika Rzeszowska

postęp w dziedzinie konstrukcji metalowych, polegający m.in. na stosowaniu nowoczesnych stopów aluminium. Stopy aluminium w budownictwie przemysłowym są stosowane już ponad kilkadziesiąt lat. Pierwsze zastosowanie konstrukcyjne stopu aluminium miało miejsce w 1931 r, kiedy na nabrzeżach Mississippi w USA zaczęła pracować dźwignica linowa z 46-metrowym ramieniem, wykonanym w całości ze stopu aluminium. W Polsce w latach sześćdziesiątych XX w. powstało kilka budowlanych konstrukcji aluminiowych, w tym palmiarnia Ogrodu Botanicznego w Krakowie, hala wystawowa, silosy aluminiowe, zbiorniki magazynowe, a także kładka dla pieszych w Gliwicach. Jednakże dopiero współczesny postęp inżynierii materiałowej, który doprowadził do powstania nowej generacji stopów aluminiowych o bardzo dobrych cechach wytrzymałościowych oraz o wysokiej trwałości, pozwolił na szersze zastosowanie tego materiału m.in. w budownictwie komunikacyjnym. Decydują o tym takie zalety stopów aluminium jak: korzystny stosunek wytrzymałości do masy, wysoka trwałość, niskie koszty utrzymania konstrukcji, łatwość wytwarzania, transportu i montażu, łatwość i dowolność kształtowania przekroju elementu oraz prawie 100% recykling i znikomy wpływ na środowisko. Ponadto plastyczność aluminium czyni konstrukcje wykonane z jego stopów szczególnie przydatnymi w regionach sejsmicznych i parasejsmicznych.

Aluminium – glin jest najbardziej rozpowszechnionym metalem na ziemi. Bardziej rozpowszechnione są tylko niemetale: tlen i krzem. Unikalne kombinacje cech stopów aluminium czynią z niego jeden z najbardziej uniwersalnych, ekonomicznych i atrakcyjnych materiałów o szerokim zakresie przydatności. W budownictwie są stosowane stopy aluminium nadające się do obróbki plastycznej. Stopy z niewielką ilością miedzi, magnezu, krzemu czy litu mają większą twardość i wytrzymałość niż czyste aluminium. Gęstość właściwa stopów aluminium w temperaturze + 20 °C wynosi około 2,7 g/cm³, ich moduł sprężystości jest ok. 70 GPa, zaś rozszerzalność termiczna wynosi 0,0000238 1/°C. Nagrzewanie np. przy spawaniu zmniejsza wytrzymałość stopów aluminium.

Pierwsze „mostowe” zastosowanie stopów aluminium miało miejsce w 1933 r na moście Smithfield Street Bridge w Pittsburghu, USA. Na starych przęsłach mostu kratownicowego typu Pauli wymieniono istniejący pokład drewniany oraz stalowe elementy pomostu, zastępując je lekkim pomostem aluminiowym, składającym się z blachy, podłużnic i poprzecznic. Ponadto na aluminiowe wymieniono także wsporniki chodnikowe z belkami i blachą pomostu oraz poręcze. Od tego czasu zakres stosowania stopów aluminium w mostownictwie systematycznie się poszerza. Obecnie można wyróżnić kilka obszarów mostownictwa, w których stopy aluminium znajdują coraz szersze zastosowanie. Pominięto celowo przedstawianie elementów wyposażenia mostów (bariery, poręcze, kraty pomostowe, itp.), koncentrując się jedynie na zastosowaniu aluminium w elementach konstrukcyjnych, tj. pomostach lub dźwigarach głównych. Pierwszym chronologicznie obszarem jest zastosowanie stopów aluminium w pomostach służących do modernizacji mostów istniejących [1]. Tradycyjnym obszarem zastosowania stopów aluminium są mosty wojskowe, gdzie lekkość stopów ma podstawowe znaczenie w osiągnięciu wysokiej mobilności i wyporności przepraw. Coraz szerzej stosowane jest aluminium w kładkach dla pieszych, co pozwala

na prawie dowolne kształtowanie ich formy architektonicznej [2]. I wreszcie ze stopów aluminium buduje się obecnie także przęsła nowych mostów drogowych. Ten ostatni obszar zastosowań stopów aluminium w mostownictwie, głównie z punktu widzenia zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, jest przedmiotem niniejszej pracy.

2. PODSTAWOWE INFORMACJE O STOPACH ALUMINIUM

Współczesne normy grupują stopy aluminium w siedem podstawowych grup, w zależności od zawartości głównych składników stopowych, dodawanych do czystego aluminium. Ogólną charakterystykę podstawowych grup stopów aluminiowych przedstawiono w tablicy 1. Podstawowym sposobem uzyskiwania odpowiedniej wytrzymałości produktów aluminiowych jest walcowanie na zimno, stosowane podczas produkcji blach lub kształtowników. Dla trzech grup stopów (2000, 6000, 7000) stosuje się dodatkowo obróbkę cieplną (m.in. hartowanie, odpuszczanie, starzenie). Odporność na korozję konstrukcji wykonanych ze stopów poszczególnych serii sklasyfikowano w zakresie od A (najwyższa) do D (niska). Należy zaznaczyć, że dotyczy to korozji ogólnej, spowodowanej oddziaływaniem czynników zewnętrznych. Każdy ze stopów aluminium jest w równym, bardzo wysokim stopniu narażony na korozję galwaniczną, powstającą na styku z innym metalem. Dobra spawalność i możliwość kształtowania przez wyciskanie to główne zalety stopów aluminium, dlatego w tablicy 1 podano również charakterystykę stopów w tym zakresie. W tablicy 1 nie uwzględniono stopów grupy 4000, gdyż są one bardzo rzadko stosowane do wyrobu elementów konstrukcyjnych. Stosuje się je głównie do produkcji odlewniczej oraz jako drut spawalniczy.

Tablica 1. Podział i charakterystyka stopów aluminium
Table 1. Types and properties of aluminium alloys

Rodzaj stopu	Stopy bez obróbki cieplnej			Stopy z obróbką cieplną				
Grupa	1000	3000	5000	2000	6000		7000	
Główne dodatki	czyste aluminium	Mn mangan	Mg magnez	Cu miedź	Mg, Si magnez, krzem		Zn, Mg cynk, magnez	
Typ stopu					słaby	mocny	słaby	mocny
Wytrzymałość na rozciąganie f_t [N/mm ²]	150	200	300	400	200	300	350	550
Wydłużenie względne ϵ_t [%]	3-4	5	10	10	12	8	12	10
Poziom trwałości	A	A	A	D	B	B	C	D
Spawalność	tak	tak	tak	nie	tak	tak	tak	nie
Możliwość wyciskania	bardzo dobra	-	średnia, słaba	słaba	bardzo dobra	dobra	średnia	słaba

We współczesnych zastosowaniach konstrukcyjnych najczęściej używane są stopy grup 5000 oraz 6000. Blachy i arkusze produkowane obecnie głównie ze stopów grupy 5000 i są to wyroby walcowane na zimno. Zawartość magnezu od 1 do 5 % wraz z niewielkim dodatkiem manganu pozwala na stworzenie szerokiego zakresu stopów grupy 5000 o różnych właściwościach plastycznych i wytrzymałościowych, odpowiednich do wybranych zastosowań. Odporność korozyjna tej grupy stopów jest zazwyczaj bardzo wysoka, z wyjątkiem stopów o najwyższej wytrzymałości, które specyficznie korodują w gorącym klimacie. Stopy o niższej wytrzymałości mają doskonałą formowalność i są stosowane do produkcji arkuszy, natomiast stopy o wyższej wytrzymałości (powyżej 300 MPa) stosuje się zwykle do produkcji blach na konstrukcje spawane. Stopy grupy 5000 charakteryzują się gorszą od innych stopów zdolnością do kształtowania przekrojów przez wyciskanie, dlatego nie produkuje się wyrobów z tych stopów w procesie ekstruzji.

Stopy grupy 6000, zawierające jako dodatki głównie magnez i krzem, stanowią największy udział w ogólnej produkcji stopów aluminium, poddawanych obróbce cieplnej. Łączą one w sobie znaczną wytrzymałość z dużą odpornością na korozję i doskonałą zdolnością do kształtowania w procesie wyciskania. Ponadto stopy grupy 6000 są bardzo dobrze spawalne, ze znaczącym jednakże wpływem ciepła spawania na obniżenie wytrzymałości elementu. Generalnie stopy te dzieli się na dwie grupy: o niższej i wyższej wytrzymałości. Bardziej wytrzymałe stopy grupy 6000 są zazwyczaj porównywane do stali węglowej. W rzeczywistości są one trochę „słabsze”, gdyż przy porównywalnej granicy plastyczności (ok. 250 MPa) mają niższą wytrzymałość na rozciąganie (ok. 300 MPa), a ponadto są także mniej plastyczne. Mniej wytrzymałe stopy grupy 6000 nie są stosowane do wyrobów blach czy arkuszy, a jedynie do wyrobu kształtowników (profilów) wyciskanych. Są to najbardziej odpowiednie stopy do procesu ekstruzji, który umożliwia tworzenie bardzo skomplikowanych przekrojów elementów. Stopy te stosuje się w elementach konstrukcyjnych, w których poziom naprężeń nie jest wysoki, lecz które muszą mieć stosunkowo dużą sztywność oraz być odporne na korozję i zmęczenie. W tabelicy 2 podano charakterystykę wybranych stopów aluminium, mających najszersze zastosowanie w budownictwie mostowym.

3. HISTORIA MOSTÓW DROGOWYCH Z ALUMINIUM

Przędła mostowe ze stopów aluminium zaczęto budować po II wojnie światowej. Od tej pory powstało na świecie kilkadziesiąt różnego rodzaju mostów drogowych, w których zastosowano stopy aluminium. Jednakże pierwszą, aluminiową konstrukcją mostową było jedno z siedmiu przęseł mostu kolejowego w Massenie, położonego w ciągu linii kolejowej do jednej z hut aluminium koncernu Alcoa w Kanadzie. Natomiast pierwsze zastosowanie stopów aluminium w drogowych obiektach mostowych miało miejsce w Anglii, gdzie wykorzystano aluminium do budowy mostów zwodzonych. Pierwszym europejskim mostem aluminiowym był dwukłapowy most zwodzony systemu Scherzera o konstrukcji kratownicowej, wybudowany w 1948 r w Sunderland (rys. 1).

Tablica 2. Właściwości mechaniczne stopów aluminium stosowanych do budowy mostów
 Table 2. Mechanical properties of aluminium alloys used in bridge construction

Gatunek stopu *)	Stan utwardzenia	Właściwości mechaniczne				
		$f_{0,2}$ (MPa)	f_t (MPa)	ϵ_t (%)	τ_t (MPa)	HB
5083	O	125	270	10	162	70
	F	110	270	10	162	70
	H 112	125	270	10	162	75
6005A	T4	90	180	13	108	70
	T6	225	270	6	162	80
6063	T4	65	130	12	78	50
	T6	170	215	6	129	75
6082	T4	110	205	12	123	70
	T6	260	310	8	186	95
7020	T4	190	300	12	180	110
	T6	290	350	8	210	120

*) według normy PN EN 573-3:1998 „Aluminium i stopy aluminium - Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie - Skład chemiczny” oznaczenia numeryczne poprzedzane są literami EN AW



Rys.1. Pierwszy aluminiumowy most zwodzony w Sunderland, Anglia
 Fig.1. The first aluminium movable bridge in Sunderland, England

Głównym powodem wyboru stopów aluminium do budowy tego mostu był słaby grunt. Ponadto, jak stwierdził jeden z inżynierów brytyjskich uczestniczących w projekcie „w tamtych czasach panował bardzo duży optymizm w stosunku do nowych zastosowań aluminium, a konstruktorzy byli pod stałym naciskiem *Aluminium Development Corporation*, a także rządu brytyjskiego, aby stosować ten materiał”. Konstrukcja przeszła mostu w Sunderland składała się z 2 kratownic w rozstawie osiowym 6,02 m oraz opartego na nich dolnego pomostu. Na belkach pomostu ułożono blachę aluminiową o grubości 10 mm, pokrytą nawierzchnią asfaltową. Z wyjątkiem przeciwwagi i części nieruchomych cała konstrukcja przeszła została wykonana ze stopów aluminium. Most rozebrano w 1976 r. ze względu na występowanie rozległych objawów korozji galwanicznej, głównie w połączeniach nitowanych i ich sąsiedztwie. Okazało się bowiem, że powłoka malarska nie zabezpieczała skutecznie elementów aluminiowych przed korozją galwaniczną w kontakcie ze stalą nitów. Odporność na korozję użytych stopów z grupy 2000 była dużo niższa niż przypuszczano. W latach 50-tych XX wieku podobne mosty wybudowano także w Aberdeen i Gloucester, zmieniając jednak rodzaj stopów, łączników oraz powłoki ochronnej na połączeniach nitowanych [2].

Jednym z najdłuższych na świecie mostów drogowych wykonanych ze stopów aluminium jest most zbudowany przez kanadyjski koncern Alcan w latach 1949 - 1950 w miejscowości Arvida w Kanadzie (rys. 2). Na wybór aluminium do budowy tego mostu wpłynęła głównie bliskość wytwórni wyrobów z aluminium, lecz także chęć obniżenia kosztów montażu (wysokie położenie mostu nad terenem), zmniejszenie trudnych do wykonania fundamentów, a także „metaliczny” wygląd mostu, harmonizującego z otoczeniem jasnych skał. Główne przeszło mostu to łuk bezprzegubowy z jazdą górą o rozpiętości 88,5 m i wysokości w kluczu 14,4 m. Dwa nitowane dźwigary łukowe, umieszczone w rozstawie poprzecznym 7,0 m, stężono skratowaniem w układzie X. Z obu stron przeszła łukowego jest po pięć przęseł dojazdowych o rozpiętości 6,10 m, tworzących dwie belki ciągłe o długości po 30,50 m. Konstrukcję pomostu wykonano jako ruszt belkowy, składający się z trzech ciągłych podłużnic oraz łączących je poprzecznie o wysokości konstrukcyjnej 0,77 m. Na belkach pomostu ułożono blachę z czystego aluminium grubości 1,5 mm, a na niej ułożono płytę żelbetową grubości 0,20 m i nawierzchnię bitumiczną grubości 65 mm. Ruszt oparty jest na łukach za pomocą słupów o przekroju skrzynkowym. Słupy nie są stężone ze sobą z wyjątkiem podpór nad węzłami łuków, w których słupy połączono dwiema belkami poprzecznymi. Most w Arvida jest w ciągłej eksploatacji do chwili obecnej, a koszty jego utrzymania są bardzo niskie. Np. koszt utrzymania mostu w latach 1950 – 1983 wyniósł tylko 5.000 \$, a jedynym poważniejszym zabiegiem utrzymaniowym była wymiana nawierzchni bitumicznej [4].

Pierwszy nie zwodzony most aluminiowy na kontynencie europejskim wybudowano w 1951 r. na Węgrzech. Był to most przez kanał nawadniający w miejscowości Szabadszállás (rys. 3). Most miał dwa aluminiowe nitowane dźwigary główne w rozstawie 6,72 m, stężone pięcioma dwuteowymi poprzecznikami, na których dodatkowo oparto podłużnicę środkową. Na konstrukcji aluminiowej wykonano dwojakiemu rodzaju płytę pomostu. W skrajnych polach rusztu oraz w jednym z pól środkowych ułożono 6 żelbetowych paneli prefabrykowanych grubości 0,15 m. Panele nie były zespolone

z dźwigarami aluminiowymi. Natomiast w jednym z pól środkowych rusztu wykonano pomost aluminiowy, składający się z ceowników i blachy, połączonych z rusztem pomostu za pomocą galwanizowanych śrub stalowych. Na pomoście ułożono nawierzchnię asfaltową. Most był w eksploatacji do 1989 roku. Obecnie jego aluminiowa konstrukcja znajduje się w muzeum drogownictwa w Kiskorös na Węgrzech [5].

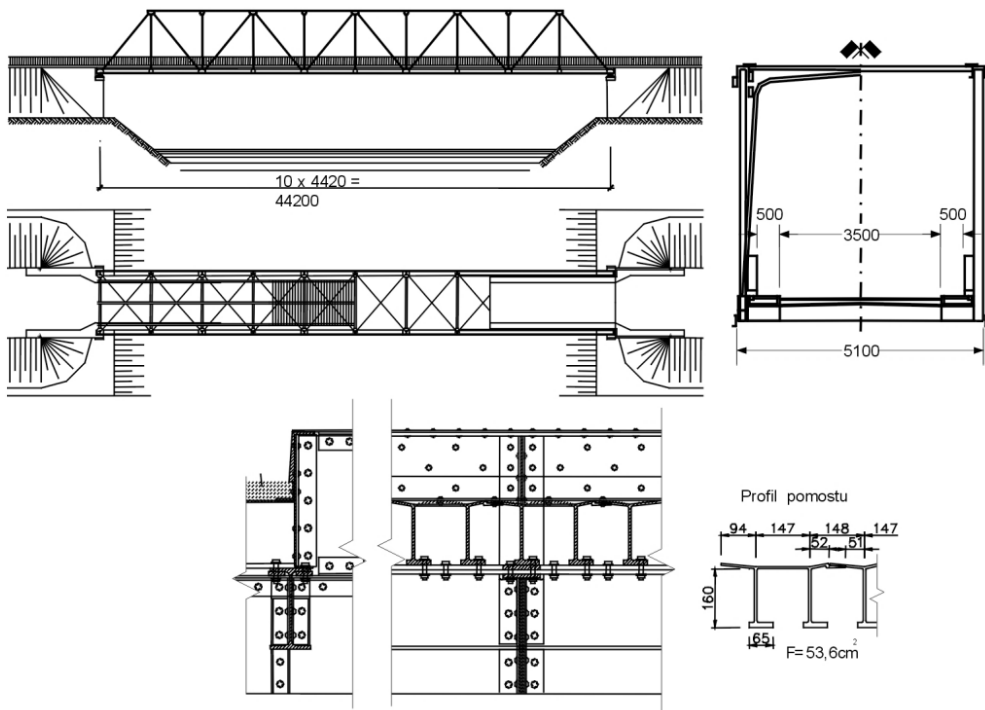


Rys.2. Najdłuższy aluminiowy most drogowy w Arvida, Kanada
Fig.2. The longest aluminium road bridge in Arvida, Canada



Rys.3. Aluminiowa konstrukcja mostu węgierskiego w muzeum drogownictwa w Kiskorös
Fig.3. The aluminium superstructure of the Hungarian road bridge
in Kiskorös Road Museum, Hungary

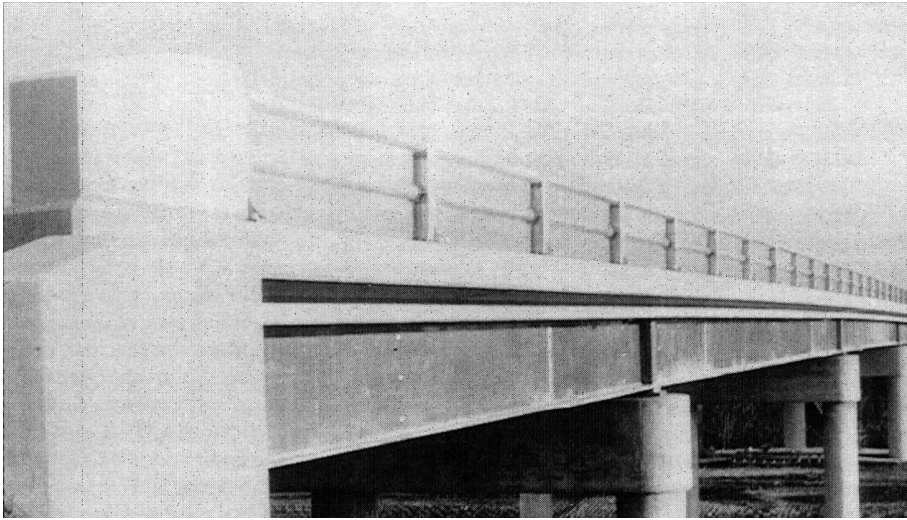
Pierwszym niemieckim mostem drogowym, wykonanym ze stopów aluminium, jest most „Schwansbell” nad kanałem Datteln-Hamm w miejscowości Lünen, wybudowany w 1956 r. Jest to jednoprzęsłowa kratownica z jezdnią dolną o rozpiętość 44,20 m (rys. 4). Wysokość konstrukcyjna dźwigarów kratownicowych wynosi 5,40 m. Przekroje prętów dźwigarów wykonano z profili, wytwarzanych specjalnie dla tej konstrukcji. Ze względu na ówczesne możliwości wytwórni, przekrój kształtowników musiał się zmieścić w kole o średnicy 350 mm, a najmniejsza grubość ścianki wynosiła 4 mm. Na całą konstrukcję użyto łącznie 16 typów profili aluminiowych. Przekroje elementów kratownicy są zbliżone do stosowanych wówczas powszechnie w konstrukcjach stalowych. Na pas górny zastosowano profile o przekroju kapeluszowym (odwrócone lub Ω), składające się ze względu na zbyt duże wymiary z dwóch kształtowników, połączonych ze sobą za pomocą nitów. Podobną konstrukcję ma pas dolny i krzyżulce skrajne. Krzyżulce rozciągane mają kształt szerokostopowego dwuteownika ze wzmocnionymi krawędziami, a słupki mają typowy przekrój dwuteowy. Pomost wykonano w postaci rusztu z dwuteowych poprzecznic i podłużnic, na którym oparto specjalne panele z profili aluminiowych w kształcie podwójnego T. Na pomoście ułożono nawierzchnię asfaltową grubości 60 mm. Przęsło zmontowano w warsztacie położonym nad kanałem żeglugowym i spławiono w całości na dwóch pływakach do miejsca wbudowania, gdzie podniesiono je za pomocą dwóch żurawi samojezdných, stojących za przyczółkami i osadzono na łożyskach [6].



Rys.4. Konstrukcja kratowego mostu drogowego w Lünen, Niemcy
 Fig.4. The truss superstructure of the road bridge in Lünen, Germany

Pod koniec lat 50. XX w. w USA rozpoczęto realizację zakrojonego na olbrzymią skalę programu budowy autostrad. Program zakładał m.in. budowę w ciągu 10 lat ponad 60 tys. mostów drogowych. Spowodowało to znaczny wzrost ceny stali oraz konieczność długiego oczekiwania na wykonanie konstrukcji stalowych w wytwórniach. Konsekwencją takiego stanu był wzrost zainteresowania stopami aluminium, jako alternatywnym materiałem konstrukcyjnym, szczególnie dla mostów o małych i średnich rozpiętościach. Pomimo, że ówczesny koszt stopów aluminium był znacznie wyższy niż koszt stali, rekompensowany był on przez zmniejszenie ciężaru konstrukcji, znaczne uproszczenie, a przez to zmniejszenie kosztów jej wytwarzania, transportu i montażu na placu budowy, a zwłaszcza przyśpieszenie realizacji poszczególnych inwestycji. Powodem coraz szerszego zastosowania aluminium była także rosnąca świadomość administracji drogowej USA o znaczeniu kosztów utrzymania infrastruktury drogowej. Stosowanie stopów aluminium znacznie zmniejszało te koszty. Wszystkie te fakty doprowadziły do tego, że w latach 1958 – 1963 opracowano kilka prototypowych konstrukcji mostowych z aluminium, przeznaczonych do produkcji masowej. W tym czasie wybudowano w USA siedem mostów drogowych o nowoczesnych konstrukcjach i z ulepszonych jakościowo stopów aluminium.

Pierwszym z nich był wiadukt nad autostradą w Des Moines w stanie Iowa - pierwszy na świecie całkowicie spawany drogowy obiekt mostowy, wykonany ze stopu aluminium (rys. 5). Był on także pierwszym obiektem mostowym o konstrukcji zespolonej, tj. aluminiowo – betonowej. Wiadukt został zaprojektowany i wybudowany jako prototyp, będący wynikiem programu badawczego administracji drogowej stanu Iowa, wspartego finansowo przez 3 wielkie amerykańskie koncerny aluminiowe (Alcoa, Kaiser i Reynolds), które pokryły 20% kosztów wytworzenia konstrukcji. Obiekt w Des Moines miał być typowym dla tysięcy ówczesnie budowanych wiaduktów nad autostradami. Wiadukt był obiektem czteroprzęsłowym, ciągłym, ze czterema blachownicami spawanymi w rozstawie 2,60 m, zespolonymi z betonową płytą pomostu grubości 0,20 m. Konstrukcję aluminiową wykonano z nowych w tamtych czasach stopów aluminium z magnezem (grupa 5000), o wyższej wytrzymałości, spawalności i odporności korozyjnej niż stopy stosowane poprzednio. Aluminiowe dźwigary główne miały wysokość całkowitą 0,961 m i były stężone spawanymi poprzecznikami dwuteowymi. Żelbetowa płyta pomostu była zespolona z dźwigarami za pomocą łączników wykonanych z kątowników aluminiowych. Pasy górne i wszystkie inne powierzchnie aluminium stykające się z betonem zabezpieczono za pomocą farb chromianowo-cynkowej i bitumicznej, odpornych na alkaliczne środowisko betonu. Ponieważ elementy montażowe były lekkie, zastosowano tylko jedno połączenie montażowe na długości dźwigarów oraz połączenia w poprzecznicach środkowych. Styki montażowe zostały wykonane przy użyciu aluminiowych śrub sprężających. Montaż całej konstrukcji aluminiowej trwał 1,5 dnia. We wrześniu 1993 roku, w związku z rozbudową węzła komunikacyjnego, wiadukt został rozebrany i zastąpiony betonową konstrukcją sprężoną [7].



Rys.5. Spawany wiadukt aluminiowy w Des Moines, Iowa, USA
 Fig.5. The welded aluminium viaduct in Des Moines, Iowa, USA

W latach 1959-60 powstały dwa równoległe jednoprzęsłowe wiadukty drogowe w ciągu Long Island Expressway w Nowym Jorku (rys. 6). Konstrukcję przęsła wykonano z 17 w wiadukcie zachodnim i 18 we wschodnim, nitowanych dźwigarów blachownicowych o wysokości 1,22 m, ustawionych w rozstawie poprzecznym 2,13 m. Wysokość dźwigarów dobrano z warunku, aby maksymalne ugięcie nie przekroczyło wartości $L/800$. Dźwigary stężono wzajemnie trójkątnymi tężnikami, wykonanymi z kątowników. Wszystkie elementy dźwigarów i stężeń połączono za pomocą nitów aluminiowych. Na dźwigarach wykonano betonową płytę pomostu grubości 0,18 m, którą zespolono z dźwigarami za pomocą galwanizowanych łączników stalowych. Montaż jednego obiektu wykonano w ciągu 2 dni, układając parami stężone wzajemnie dźwigary na łożyska. Styki montażowe wykonano stosując galwanizowane stalowe śruby sprężające. W 1998 r. przęsła aluminiowe zostały zdemontowane i zastąpione konstrukcją stalową o podobnym kształcie. Obiekt był użytkowany bez poważniejszych uszkodzeń blisko 40 lat, przenosząc dziennie ponad 140 000 pojazdów, z czego 18 % stanowiły samochody ciężkie [8].

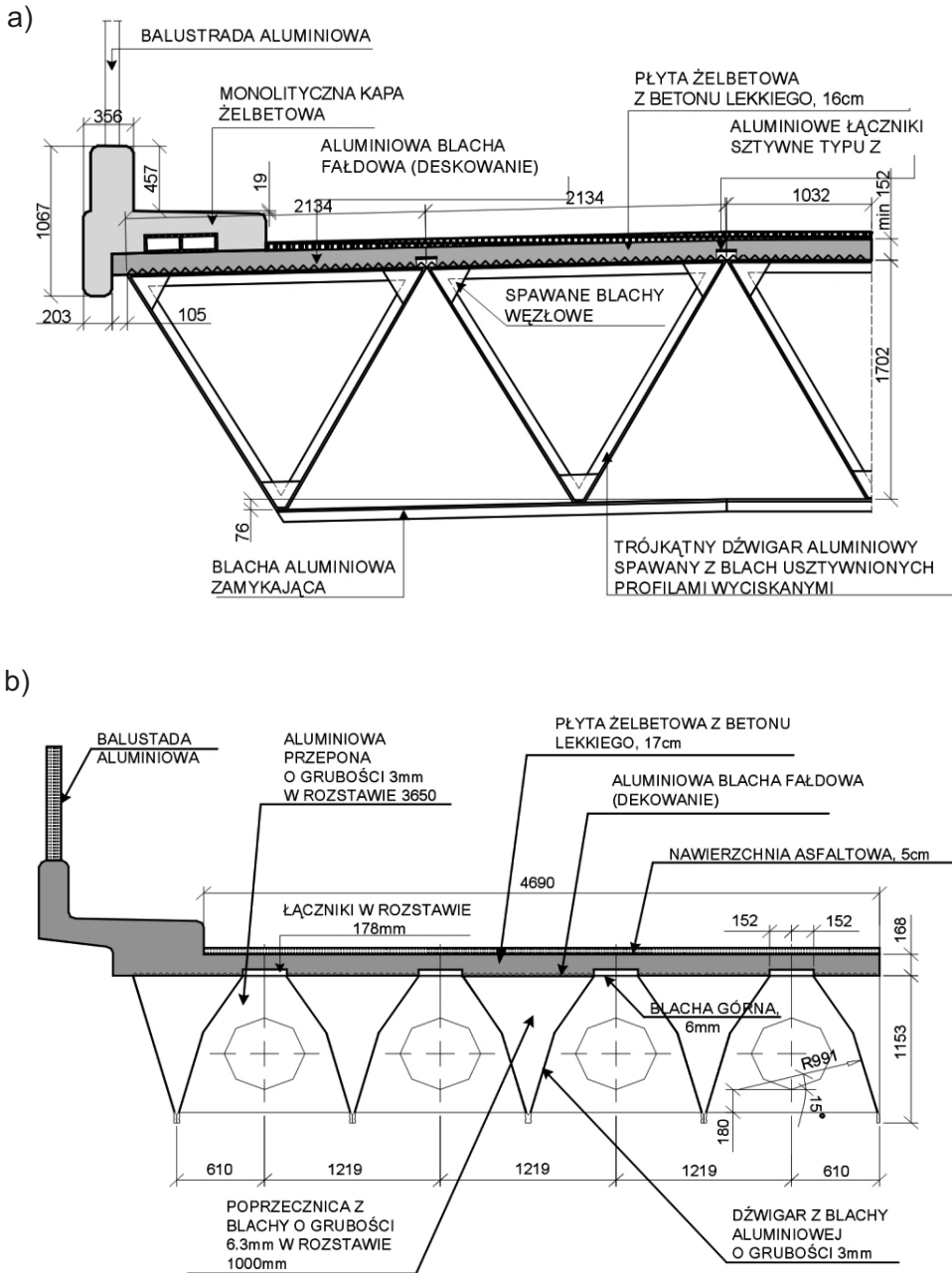
Na początku lat 60. amerykańska firma Fairchild Engine and Airplane Corporation, specjalizująca się w budowie samolotów, wdrożyła prototypową konstrukcję przęsła mostowych, wykonaną ze stopu aluminium i wzorowaną na konstrukcji skrzydła samolotu (ang. *Fairchild bridge system*). W celu ograniczenia masy stopu aluminium zastosowano nietypowy kształt dźwigarów, składający się z trzech blach, połączonych wzajemnie w trójkątny przekrój skrzynkowy. Stworzono w ten sposób konstrukcję quasipowłokową, dodatkowo wzmocnioną żebrami i przeponami wewnętrznymi. Typowe przęsło mostu składa się z trzech do sześciu trójkątnych dźwigarów, wzajemnie połączonych i stężonych specjalnymi kształtownikami aluminiowymi, tworzących w rezultacie przekrój trapezowy (rys. 7a). Pojedyncze dźwigary mają szerokość 3,0 m

i wysokość 1,8 m. Blachy środników grubości od 2,0 do 2,6 mm zostały gęsto uźbrowane kątownikami oraz blachami węzłowymi, przyspawanymi w narożach. Do prefabrykowanych trójkątnych belek skrzynkowych przynitowano długie, specjalnie zaprojektowane kształtowniki wyciskane, a następnie skręcano razem w narożnikach. Od dołu całą konstrukcję przeszła dodatkowo stężono kątownikami. Połączone wzajemnie dźwigary trójkątne uzupełniono od góry i od dołu blachą aluminiową. Blachy dolne grubości od 2,6 do 5,2 mm stanowią nie tylko osłonę, ale także część rozciąganą przekroju dźwigara. Natomiast fałdowa blacha górna grubości od 0,8 do 1,6 mm, stanowiła jednocześnie deskowanie dla wykonania żelbetowej płyty pomostu grubości 0,15-0,19 m oraz była dodatkowym usztywnieniem przeszła do czasu związania betonu. Płyta z betonu lekkiego była zespolona z konstrukcją dźwigarów za pomocą specjalnych zetowych łączników aluminiowych. Dla zabezpieczenia blachy górnej przed alkalicznym środowiskiem betonu, pokryto ją powłoką z farby chromianowo - cynkowej. System został zaprojektowany dla mostów o rozpiętości przeseł 25 – 30 m [9]. Pierwsze dwa czteroprzęsłowe wiadukty systemu Fairchild zbudowano w 1961 r. nad autostradą Sunrise Highway na Long Island w Nowym Jorku (rys. 8). Kolejny, prawie identyczny jak dwa poprzednie, trójprzęsłowy obiekt mostowy został wybudowany w miejscowości Sykeville w stanie Maryland. Czwarty, tym razem jednoprzęsłowy most został zbudowany przez rzekę Appomattox w Petersburgu, Virginia.



Rys.6. Konstrukcja nitowanego wiaduktu aluminiowego nad Jericho Turnpike w Nowym Jorku, USA

Fig.6. The riveted superstructure of aluminium viaduct over Jericho Turnpike in New York, USA



Rys.7. Przekroje poprzeczne amerykańskich mostów aluminiowych:

a) most systemu Fairchild, b) most systemu Reynolds - Baroni

Fig.7. The cross-sections of American aluminium bridges:

a) Fairchild system bridge, b) Reynolds - Baroni system bridge



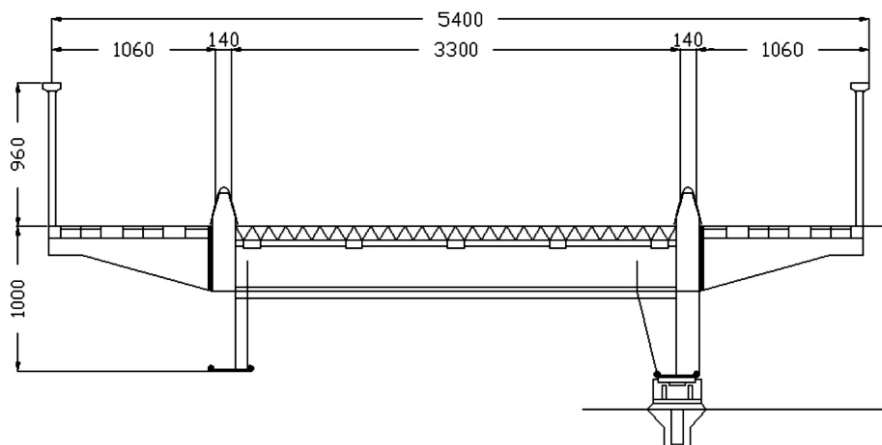
Rys.8. Wiadukt systemu Fairchild nad autostradą Sunrise Highway na Long Island w Nowym Jorku

Fig.8. Fairchild system viaduct over Sunrise Highway in Long Island, New York

Również na początku lat 60-tych powstał kolejny system mostowych przęseł ze stopów aluminium, opracowany przez firmę Reynolds Metals Company pod kierunkiem profesora Giorgio Baroni (ang. *Reynolds – Baroni bridge system*). Jest on podobny do systemu Fairchild z tą różnicą, że środniki dźwigarów wykonano z parabolicznie zakrzywionych blach aluminiowych grubości 3,2 mm, uzupełnionych od góry blachą fałdową (rys. 7b). Dźwigary są połączone pomiędzy sobą za pomocą specjalnych profili wyciskanych, przyspawanych do dolnych krawędzi środników i połączonych wzajemnie na śruby. Jednakże w odróżnieniu od poprzedniego rozwiązania, w systemie Reynolds – Baroni nie ma poziomej blachy dolnej. Wysokość dźwigara wynosi 1,03 m, a jego szerokość w górnej części wynosi 1,22 m. Dźwigary usztywnione są przeponami (poprzecznkami) z blachy grubości 6,3 mm. Podobnie jak w systemie Fairchild, fałdowa blacha górna stanowiła deskowanie dla wykonania żelbetowej płyty pomostu z betonu lekkiego grubości 0,17 m, zespolonej z dźwigarami za pomocą specjalnych zetowych łączników aluminiowych. System zaprojektowano dla przęseł mostowych o rozpiętości do 30 m. Jedynym obiektem systemu Reynolds-Baroni jest most nad Big Wills Creek w Alabamie o długości całkowitej 71,5 m [9].

Do znaczącego zwiększenia liczby budowanych obiektów mostowych ze stopów aluminium przyczynił się postęp technologiczny, jaki dokonał się w pierwszej połowie lat 60. w europejskim przemyśle aluminiowym. Był on związany z nowymi możliwościami produkcji aluminiowych wyrobów wyciskanych oraz z rozwojem dostosowanych do tej technologii stopów aluminium. Przykładem nowych możliwości była np.

największa wówczas w Europie prasa do wyciskania profili w wytwórni Aluminium – Waltzwerke w Singen, Niemcy. Prasa ta mogła produkować profile o przekroju wpisanym w koło o średnicy 500 mm lub w prostokąt o wymiarach 150×600 mm. Umożliwiało to produkcję kształtowników o dużych i skomplikowanych przekrojach oraz relatywnie cienkich ściankach. Ponadto nacisk prasy, równy 8 000 ton, umożliwiał wytworzenie kształtowników o długości nawet do 25 m, co w wielu przypadkach wykluczało konieczność wykonywania styku na długości np. dźwigara. Udoskonalona metoda automatycznego spawania stopów aluminium (MIG) pozwalała na szybkie i pewne łączenie poszczególnych części w duże elementy budowlane, które dzięki swojej lekkości mogły być scalane w wytwórni i w całości przewożone na miejsce wbudowania. Przykładem tych nowych możliwości jest m.in. most drogowy, zbudowany w 1968 r. w Singen (rys. 9). Przęsło mostu jest zbudowane z dwóch dźwigarów blachownicowych o wysokości 1,0 m, których pasy dolne zostały wykonane ze specjalnych profili wyciskanych. Dźwigary były stężone poprzecznicami o przekroju dwuteowym, w których ukształtowano spawane styki montażowe. Pomost wykonano ze specjalnych profili o wymiarach 100×300 mm, składających się z układu kilku trójkątów, tworzących po zespawaniu ortotropową i bardzo sztywną płytę. Profile były układane równoległe do osi mostu i spawane bezpośrednio do poprzecznic [10].



Rys.9. Przekrój poprzeczny drogowego mostu aluminiowego w Singen, Niemcy
Fig.9. The cross-sections of road aluminium bridge in Singen, Germany

W drugiej połowie lat 60. ubiegłego wieku zaczęto szerzej stosować stopy aluminium w konstrukcjach budowlanych także w krajach dawnego obozu socjalistycznego. Po pozytywnych doświadczeniach węgierskich, także w byłym ZSRR wykonano pierwszy most z aluminium, który powstał w 1963 r. nad rzeką Ozierną [11]. Była to kratownica z jazdą górą, stanowiąca przęsło nurtowe pięcioprzęsłowego mostu drogowego. Pozostałe cztery przęsła zalewowe zostały wykonane jako typowa żelbetowa konstrukcja

monolityczna. Aluminiowy ustrój nośny przęsła nurtowego składał się z 4 dźwigarów kratownicowych typu Warrena o wysokości konstrukcyjnej 2,70 m. Dźwigary ustawione w rozstawie poprzecznym 2,0 m, były stężone skratowaniem w poziomie pasa dolnego oraz dwoma tężnikami poprzecznymi w osiach podparcia przęsła. Aluminiowe pręty kratownicy zostały wykonane z profili wyciskanych. Liczbę profili ograniczono do czterech: kolejno profil na pas górny o przekroju odwróconego U, oraz profile na pas dolny, krzyżulce ściskane oraz krzyżulce rozciągane, wszystkie o przekroju dwuteowym. Elementy kratownic były łączone w węzłach za pomocą nitów aluminiowych o średnicy 20 mm. Pomost został wykonany w postaci płyty żelbetowej grubości 0,20 m, zespolonej z pasami górnymi kratownic za pomocą kątowników aluminiowych. Konstrukcję aluminiową złożoną z dwóch tandemów wykonano w całości w wytwórni. Tandemy przetransportowano na miejsce wbudowania, a montaż odbywał się z przęsła zalewowych za pomocą dwóch dźwigów samochodowych o udźwigu 10 T.

Do końca lat 60. XX wieku wybudowano na świecie ponad 60 obiektów mostowych (głównie małych mostów drogowych i kładek dla pieszych), w których zastosowano stopy aluminium w konstrukcjach przęsła. Jednakże lata 70 i 80 nie przyniosły spodziewanego wzrostu wykorzystania stopów aluminium w mostownictwie. Głównym tego powodem był znaczący wzrost cen aluminium na rynkach światowych, co pomimo innych zalet tego metalu, czyniło jego stosowanie nieekonomicznym. Pomimo tego, także w latach 70. wybudowano kilka ciekawych obiektów mostowych, w których wykorzystano stopy aluminium. Liderem w tym czasie była Francja, gdzie zrealizowano duży program badawczo – wdrożeniowy, mający na celu rehabilitację starych mostów wiszących, wybudowanych na przełomie XIX i XX wieku. Mosty te były zbudowane zazwyczaj ze stalowych dźwigarów kratownicowych, pokrytych drewnianym pomostem i podwieszonych za pomocą wieszaków i lin stalowych do kamiennych pylonów. Zastosowanie lekkich stopów aluminium do modernizacji takich mostów pozwoliło na zachowanie ich formy i kształtu, pozostawienie większości starych elementów, tj. lin, wieszaków i konstrukcji podpór, oraz wykonanie modernizacji w sposób bardzo efektywny zarówno z konstrukcyjnego jak i ekonomicznego punktu widzenia. W konsekwencji zmniejszenia ciężaru własnego przęsła uzyskano także zwiększenie nośności tych mostów. Stopy aluminium zastosowano m.in. do modernizacji dwóch starych mostów wiszących w Montmerle oraz w Groslée.

Most przez Saonę w Montmerle jest pierwszym na świecie mostem wiszącym o konstrukcji ze stopów aluminium. Podpory mostu pochodzą z 1834 r., gdy powstał w tym miejscu wiszący most łańcuchowy. Zniszczony w czasie drugiej wojny światowej, most został odbudowany w 1947 r. jako wisząca konstrukcja stalowa z pomostem drewnianym. Po blisko 20 latach eksploatacji, na skutek korozji stali i zniszczeń pomostu, ograniczono nośność mostu pierwotnie do 4 T, a następnie do 1,5 T, zmniejszając także dozwoloną prędkość poruszania się pojazdów do 30 km/h. Ze względu na tak znaczące ograniczenia, w 1973 r. podjęto decyzję o modernizacji obiektu. Pierwotny projekt zakładał wykonanie nowej konstrukcji przęsła ze stali i drewna. Jednakże po powtórnej analizie statycznej, wykonanej z inicjatywy firmy Pechiney – największego francuskiego producenta aluminium - zdecydowano się na zmianę konstrukcji na aluminiową, zmniejszając ponad dwukrotnie ciężar własny przęsła i uzyskując zwiększenie

nośności i zmniejszenie ilości stali przeznaczonej na liny nośne i wieszaki. Modernizację mostu potraktowano jako eksperyment, zatem projekt konstrukcji aluminiowej został wykonany bardzo bezpiecznie. Chociaż głównym kryterium projektowym była minimalizacja ugięcia przęsła, nie wykorzystano w obliczeniach przestrzennej ich sztywności. Głównymi elementami nowej konstrukcji aluminiowej są poprzecznie o wysokości 250 mm, podwieszane za pomocą wieszaków do lin nośnych, oraz ustawione na poprzecznicach belki usztywniające w postaci kratownic o wysokości 1,55 m, pełniące jednocześnie rolę balustrad. Poprzecznice są stężone w poziomie pasów dolnych zwiatrowaniem w układzie X, wykonanym z kątowników. Pasy kratownic usztywniających wykonano z profili o przekroju ceowym, natomiast słupki i krzyżulce z dwuteowników. Pomiedzy kratownicami ułożono pomost, wykonany ze specjalnych profili wyciskanych o przekroju 3T. Pojedyncze profile pomostu połączono w wytwórni w panele i przyspawano do pasów górnych poprzecznic. Na aluminiowym pomoście ułożono nawierzchnię z płyt PCV grubości 7 mm. Poszczególne elementy kratownic oraz pręty zwiatrowań połączono w węzłach na aluminiowe śruby sprężające. Most jest w eksploatacji do dnia dzisiejszego [12].

Drugim francuskim drogowym mostem wiszącym, w którym zastosowano konstrukcję nośną ze stopów aluminium, jest most przez Rodan w miejscowości Groslée (rys. 10). Ten jednoprzęsłowy most wiszący zbudowano w 1912 r. W 1980 r. przeprowadzono modernizację mostu, polegającą na zastąpieniu stalowej konstrukcji przęsła z pomostem drewnianym, konstrukcją aluminiową z żelbetową płytą pomostu, wykonaną z betonu lekkiego. Konstrukcja ze stopów aluminium została wykonana w postaci sztywnej kratownicy przestrzennej, składającej się z trzech dźwigarów kratownicowych o wysokości 2,45 m i rozstawie osiowym 3,20 m, stężonych poprzecznie pionowymi tężniami oraz żelbetową płytą pomostu. Pręty kratownic głównych, podobnie jak pionowych stężeń poprzecznych, składają się z dwóch kątowników. W usztywnionych przekrojach poprzecznych przęsła umieszczono wsporniki z specjalnymi łącznikami dla wieszaków, wykonanymi w formie odlewów aluminiowych. Wszystkie elementy przęsła połączono w węzłach na aluminiowe śruby sprężające. Na pasach górnych dźwigarów oraz stężeń przymocowano łączniki zespalające oraz wykonano żelbetową płytę pomostu z betonu lekkiego grubości 0,16 m. Na płycie żelbetowej ułożono warstwę bitumiczną nawierzchni grubości 40 mm [13].

Najważniejsze parametry oraz konstrukcję historycznych mostów i wiaduktów drogowych o konstrukcji aluminiowej zestawiono w tablicy 3. Wśród aluminiowych mostów drogowych wybudowanych w omawianym pięćdziesięcioleciu przeważają konstrukcje belkowe, zarówno swobodnie podparte jak i ciągłe. Np. większość amerykańskich aluminiowych obiektów mostowych miało blachownicowe dźwigary główne, wykonane z blach walcowanych, nitowanych za pomocą wyciskanych kątowników pasowych. Natomiast w Europie częściej stosowano dźwigary kratownicowe, których pręty wykonywano z profili wyciskanych, a następnie łączono w węzłach na nity. Dźwigary kratownicowe stosowano głównie w mostach zwodzonych oraz wiszących. Jeżeli chodzi o rodzaj przęsła to wyjątkiem jest jedyna w swoim rodzaju aluminiowa konstrukcja łukowa mostu Arvida w Kanadzie, której pręty zostały wykonane z nitowanych przekrojów skrzynkowych.

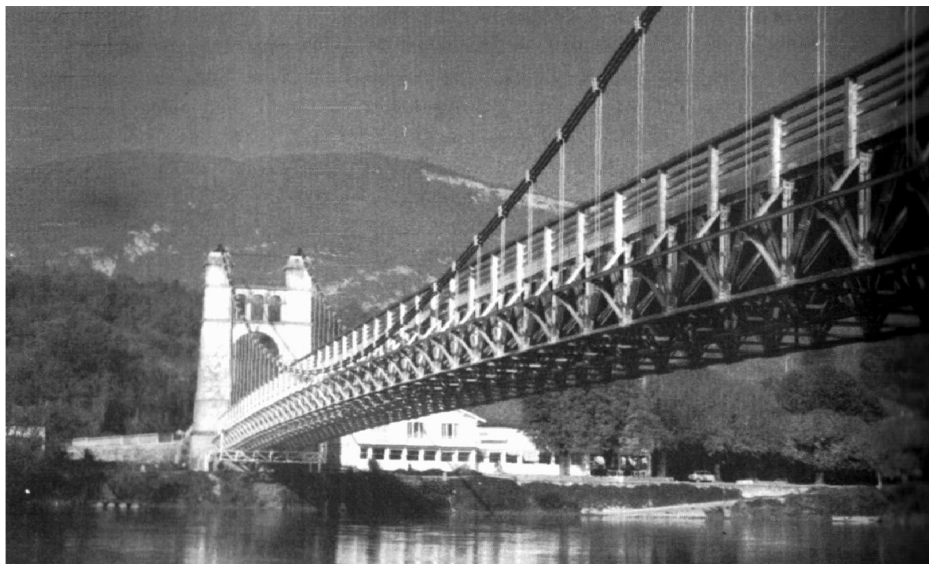
Tablica 3. Mosty i wiadukty o konstrukcji przęseł ze stopów aluminium
Table 3. Bridges and viaducts with aluminium superstructures

Lp.	Nazwa i/lub lokalizacja	Rok budowy	Opis konstrukcji aluminiowej	Rozpiętości (L) Szerokość pomostu (B)	Stopy aluminium	Masa Al całkowita i/lub jednostkowa
1	Massena, Nowy York, USA	1946	belka jednoprzęsłowa, dwie blachownice nitowane, kolejowa jezdnia otwarta, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 29,74$ m $B =$ szerokość 1 toru	2014-T6 (dźwigary) 2117-T4 (nity)	24 tony
2	Hendon Dock, Sunderland, Anglia	1948	most zwodzony, belka dwukłapowa, dwie kratownice o zakrzywionych pasach górnych, elementy kraty z blach i kątowników, pomost z dwuteowych poprzecznic, ceowych podłużnic i blachy, połączenia nitowane, nity stalowe na gorąco	$L = 27,5$ m $B = 5,64$ m	2014-A	51,5 tony 332 kg/m ²
3	Arvida, Kanada	1950	łuk i dwie belki ciągle, dwa łuki bezprzegubowe z jazdą górą, elementy o przekroju skrzynkowym, pomost belkowy z podłużnic i poprzecznic, płyta betonowa, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 5 \times 6,1 + 88,5 + 5 \times 6,1$ m $B = 7,30 + 2 \times 1,22$ m	2014-T6 (łuki i belki) 2117-T4 (nity)	180 ton 123 kg/m ²

Lp.	Nazwa i/lub lokalizacja	Rok budowy	Opis konstrukcji aluminiowej	Rozpiętości (L) Szerokość pomostu (B)	Stopy aluminium	Masa Al całkowita i/lub jednostkowa
4	Szabadszállás, Węgry	1951	belka jednoprzęsłowa, dwie blachownicze, pomost z poprzecznic dwuteowych i podłużnicy, płyta z ceowników i blach (2 panele), prefabrykowana płyta betonowa (na pozostającej części pomostu), połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno,	$L = 12,6 \text{ m}$ $B = 6,5 + 2 \times 0,75 \text{ m}$	2017A-T4	57 kg/m ² (pomost aluminiowy)
5	St.-Clement's Bridge, Aberdeen, Szkocja	1953	most zwodzony, belka dwukładowa, dwie kratownice o zakrzywionych pasach górnych, elementy z blach i kątowników, pomost z dwuteowych poprzecznic i korytkowych podłużnic, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno,	$L = 30,5 \text{ m}$ $B = 6,70 + 2 \times 1,52 \text{ m}$	2014-A (pomost) 6181 (dźwigary)	48 ton 162 kg/m ²
6	Kanał DattelIn-Hamm, Lünen, Niemcy	1956	most zwodzony, belka jednoprzęsłowa, dwie kratownice Warren, elementy z profili wyciskanych, pomost z dwuteowych poprzecznic i podłużnic, płyta z profili wyciskanych, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 44,20 \text{ m}$ $B = 3,50 + 2 \times 0,5 \text{ m}$	6061-T6 (elementy) 6061-T4 (nity)	25 ton 126 kg/m ² (całkowity) 56 kg/m ² (pomost)
7	Clive Road Bridge, Des Moines, USA	1958	belka ciąga czteroprzęsłowa, cztery blachownice dwuteowe, płyta pomostu betonowa, połączenia spawane, połączenia śrubowe, aluminiowe śruby sprężające	$L = 2 \times 12,5 + 2 \times 21 \text{ m}$ $B = 9,14 + 2 \times 0,91 \text{ m}$	5083-H113 (blachy) 5456-H321 (kątowniki)	35 tony 47,4 kg/m ²

Lp.	Nazwa i/lub lokalizacja	Rok budowy	Opis konstrukcji aluminiowej	Rozpiętości (L) Szerokość pomostu (B)	Stopy aluminium	Masa Al całkowita i/lub jednostkowa
9	Petersburg, Virginia, USA	1961	belka jednoprzęsłowa, 5 dźwigarów trójkątnych z blach (system Fairchild), płyta z betonu lekkiego, połączenia śrubowe, śruby aluminiowe i stalowe, kadmowane	$L = 29,60$ m $B = 0,91 + 8,53 + 1,52$ m	6061-T6 3004 (blacha fałdowa)	25,8 tony 45 kg/m ²
10	Amityville, Nowy York, USA (2 obiekty)	1961	belka czteroprzęsłowa, 6 dźwigarów trójkątnych z blach (system Fairchild), płyta z betonu lekkiego, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 9,10 + 2 \times 23,20 + 9,10$ m $B = 2 \times (12,80 + 0,91)$ m	6061-T6	80,7 ton 43 kg/m ²
11	Sykeville, Maryland, USA	1961	belka ciągła trójpłaszczyznowa, 5 dźwigarów trójkątnych z blach (system Fairchild), płyta z betonu lekkiego, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 28,4 + 28,7 + 32,3$ m $B = 0,94 + 9,14 + 0,46$ m	6061-T6	43 kg/m ²
12	Big Wills Creek, Alabama, USA	1965	belka 3-przędzowa, 5 dźwigarów parabolicznych z blach (system Reynolds-Baroni), płyta z betonu lekkiego, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	$L = 71,5$ m $B = 0,94 + 9,14 + 0,46$ m	5083	49 kg/m ²
13	Kanał Sharpness, Gloucester, Anglia	1962	most zwodzony, belka dwukładowa, dwie kratownice o zakrzywionych pasach górnych, elementy z blach i kątowników, pomost z dwuteowych poprzecznic, płyta z profili wyciskanych, połączenia spawane	$L = 12,2$ m	6351	7 ton

Lp.	Nazwa i/lub lokalizacja	Rok budowy	Opis konstrukcji aluminiowej	Rozpiętości (L) Szerokość pomostu (B)	Stopy aluminium	Masa Al całkowita i/lub jednostkowa
14	Singen, Niemcy	1968	belka jednoprzęsłowa, dwa dźwigary blachownicowe z blach i profili wyciskanych, poprzecznie, pomost ortotropowy z trójkątnych profili wyciskanych, połączenia spawane	L = 18 m B = 3,0 + 2x1,06 m	6061-T6	brak danych
15	Rzeka Ozierna, Rosja	1963	kratownica jednoprzęsłowa, cztery dźwigary kratowe typu Warren, elementy z profili wyciskanych, płyta betonowa, połączenia nitowane, nity aluminiowe na zimno	L = 32,4 m B = 7,0 + 2x0,75 m	2024-T4 (elementy) 2014-A (nity)	15,4 tony 55,9 kg/m ²
16	Montmerle, Francja	1973	belka wisząca, dwa dźwigary kratowe, dwuteowe poprzecznie i tężnik typu X w poziomie pasów dolnych, elementy wyciskane o przekroju kątowym i ceowym, płyta z profili wyciskanych, połączenia na śruby sprężające z aluminium oraz spawanie	L = 2x79,90 m B = 4,82 m	6082 (elementy) 5086-H111 (blachy) 7075-T73 (śruby sprężające)	68 ton 88 kg/m ²
17	Groslée, Francja	1980	belka wisząca, trzy dźwigary kratowe, pionowe tężniki, elementy z kątowników wyciskanych, płyta pomostu z betonu lekkiego, połączenia na śruby sprężające z aluminium	L = 177,20 m B = 5,0 + 2x0,90 m	6060, 6061, 6082 (elementy) 5086-H111 (blachy) 7075-T73 (śruby sprężające)	98 ton 81 kg/m ²



Rys.10. Aluminiowy most wiszący przez Rodan w Grosllée, Francja
Fig.10. The aluminium suspension bridge over Rodan in Grosllée, France

Typowa rozpiętość blachownicowych dźwigarów głównych mieści się w przedziale 10 – 30 m, a ich smukłość waha się w granicach od $1/10$ do $1/20$, zbliżając się w przypadku dźwigarów zespolonych do górnej granicy przedziału. Większa jest smukłość belek poprzecznych, dla których średnia jej wartość wynosi ok. $1/7$. Dźwigary blachownicowe wykonywano zazwyczaj z blach grubości 8 – 13 (max. 19) mm, co dawało w rezultacie smukłość średnika w przedziale $1/100$ do $1/170$. Wyjątkiem są tutaj dźwigary systemu Fairchild'a, których średnik wykonywano z blach aluminiowych grubości 2,6 mm, co stanowiło o jego bardzo dużej smukłości $1/550$ – $1/650$. Związane to było z próbą wdrożenia do mostownictwa rozwiązań z konstrukcji lotniczych. O sztywności całego dźwigara decydował bowiem jego przestrzenny, trójkątny kształt i wewnętrzne przepony. Dla zapewnienia stateczności pojedynczych blach zastosowano także gęste uźebrowanie z kątowników. Dźwigary kratownicowe stosowano w mostach drogowych znacznie rzadziej niż blachownicowe, głównie w mostach zwodzonych i wiszących. Mosty zwodzone stanowią znaczącą grupę mostów aluminiowych. Dla tego typu mostów mały ciężar konstrukcji był czynnikiem decydującym o wyborze stopu aluminium, jako głównego materiału konstrukcyjnego. W omawianym 50-leciu zbudowano 6 aluminiowych mostów zwodzonych, głównie w Anglii i Francji. Były to tzw. mosty typu Scherzera, czyli kratownicowe przesła dwukłapowe z zakrzywionym pasem górnym. W trzech przypadkach stop aluminium użyto tylko dla wykonania pomostu, natomiast w trzech pozostałych ze stopów aluminium zbudowano całe przesła. Drugim zastosowaniem kratownic aluminiowych były belki usztywniające w modernizowanych mostach wiszących. Belki te wykonano w postaci kratownic typu Warrena o smukłości w przedziale $1/50$ do $1/70$. Większa niż w przypadku blachownic smukłość belki wynika z zastosowania żelbetowej płyty pomostu, zespolonej z dźwigarami aluminiowymi, co znacznie zwiększyło sztywność

całej konstrukcji. Zbiór kratownic aluminiowych uzupełniają dwa stałe mosty drogowe, w których zastosowano typową kratownicę Warrena o długości 30 - 40 m i smukłości 1/8 i 1/12. Mniej smukła z tych kratownic należała do mostu z jazdą dołem i pomostem aluminiowym. Większą smukłość miała kratownica przeszła z jazdą górą i żelbetową płytą pomostu. We wcześniejszych aluminiowych mostach kratowych wszystkie elementy wykonywano z blach i kątowników, łącząc je za pomocą nitów i tworząc w ten sposób złożone przekroje prętów. W późniejszych rozwiązaniach stosowano już specjalne profile wyciskane, łączone początkowo za pomocą nitów lub śrub zwykłych, a następnie spawania i śrub sprężających.

Zużycie materiału w aluminiowych mostach drogowych zależało głównie od typu zastosowanych dźwigarów głównych. Dla porównania zużycia stopów aluminium w opisanych mostach drogowych przeliczono całkowitą masę użytych stopów na 1 m² powierzchni pomostu. Z zestawienia podanego w tablicy 3 wynika, że największe zużycie stopów aluminium cechuje mosty kratownicowe, w tym głównie zwodzone. Masa jednostkowa mostów zwodzonych przekracza zazwyczaj 300 kg/m², co wynika głównie z wymaganej przy ich podnoszeniu, dużej sztywności, zarówno dźwigarów kratownicowych jak i elementów pomostu. Jednakże nawet taka masa stanowi zaledwie około 40 % masy analogicznych konstrukcji stalowych, co w przypadku mostów zwodzonych przekłada się bezpośrednio na moc i zużycie energii w urządzeniach wprawiających przeszło w ruch. Zużycie stopów aluminium w przypadku kratownic wiszących jest ponad trzykrotnie mniejsze i wynosi niewiele ponad 80 kg/m². Jeszcze mniejsze jest zużycie stopów aluminium w dźwigarach kratownicowych mostów belkowych: wynosi ono około 50-70 kg/m² i jest zbliżone do średniego zużycia stopów aluminium w blachownicowych mostach belkowych, które zazwyczaj nie przekracza 50 kg/m².

4. WSPÓŁCZESNE DROGOWE MOSTY ALUMINIOWE

Na przełomie lat 80/90 ubiegłego wieku ceny aluminium spadły ponad 60 %, co spowodowało wzrost konkurencyjności stopów aluminiowych w stosunku do innych materiałów konstrukcyjnych. Główni producenci aluminium zainicjowali wówczas w kilku krajach szerokie programy badawcze, mające spowodować zwiększenie udziału tego metalu w budownictwie, w tym także w mostownictwie. Zbiegło się to w czasie z realizowanymi w kilku krajach dużymi programami modernizacji i odnowy infrastruktury komunikacyjnej. Tak było m.in. w niektórych państwach skandynawskich (Szwecja, Norwegia), w USA i Japonii. Stopy aluminium zaczęto więc powtórnie wykorzystywać, głównie do modernizacji pomostów mostów istniejących, lecz także do budowy nowych mostów drogowych oraz kładek dla pieszych [1 - 2]. Niektóre ze współczesnych aluminiowych mostów drogowych przedstawiono poniżej.

Pierwszym przykładem jest most nad rzeką Forsmo, położony tuż za kołem polarnym w Norwegii (rys. 11). Podczas modernizacji istniejącego mostu zespolonego zdecydowano się na wykonanie nowej konstrukcji przeszła ze stopów aluminium. Głównymi powodami zastosowania stopów aluminium w tym przypadku były: skrócenie

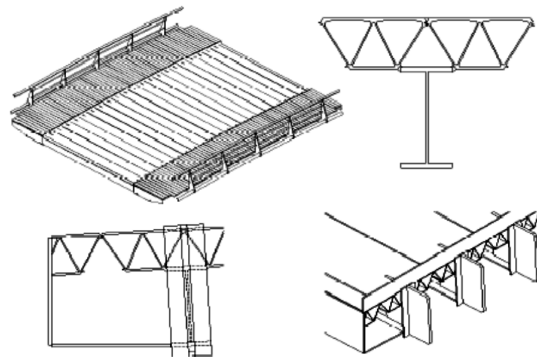
czasu zamknięcia drogi (krótki czas montażu), mały ciężar (wykorzystanie istniejących podpór) oraz niskie koszty utrzymania. Nowy most jest dwuprzęsłowy, ma 39 m długości, 7,40 m szerokości użytkowej oraz nośność 380 kN. Przęsła wykonano w postaci dwóch aluminiowych dźwigarów skrzynkowych, przykrytych aluminiowym pomostem, stanowiącym jednocześnie pas górny dźwigarów. Dźwigary stężono poprzecznie za pomocą teźników, położonych zarówno wewnątrz dźwigarów, jak również pomiędzy nimi. Pomost wykonano z kształtowników wyciskanych o przekroju zamkniętym i wymiarach 123×250 mm. Kształtowniki o długości równej szerokości pomostu, zostały ułożone prostopadle do osi mostu i wzajemnie zespawane, tworząc pomost ortotropowy. Aluminiowa konstrukcja nośna mostu, ważąca jedynie 28,5 t, została wykonana w całości w wytwórni, a następnie przewieziona na miejsce wbudowania przez ciągnik siodłowy. Montaż przęsła na podpory został wykonany za pomocą dwóch dźwigów samochodowych o udźwigu 16 T, w ciągu zaledwie 1 godziny. Po zakończeniu montażu przęsła na pomoście ułożono warstwę ochronną z żywicy epoksydowej z piaskiem oraz nawierzchnię asfaltową, a także zamontowano aluminiowe bariery ochronne. Most po oddaniu do ruchu jest przedmiotem stałego monitoringu, w celu uzyskania danych nt. pracy statycznej i dynamicznej przęsła, naprężeń wywołanych zmianami temperatur oraz trwałości i kosztów utrzymania tej prototypowej konstrukcji [14].



Rys.11. Współczesny most aluminiowy nad rzeką Forsmo w Norwegii
Fig.11. The contemporary aluminium bridge in Forsmo, Norway

W drugiej połowie lat 90. rozpoczęło się, trwające do dnia dzisiejszego, bardzo duże zainteresowanie zastosowaniem stopów aluminium w budowie mostów w Holandii. Zapoczątkowane ono zostało w 1997 r. międzynarodowym przetargiem architektonicznym

na zaprojektowanie i budowę 13 mostów drogowych i 43 kładek pieszo-rowerowych na osiedlu mieszkaniowym Leidschenveen, niedaleko Hagi. Projekt obejmował 15 typowych obiektów mostowych. Każdy z obiektów typowych miał indywidualną konfigurację parametrów użytkowych. Spośród zgłoszonych ponad 100 projektów wstępnych, międzynarodowe jury wybrało 5 propozycji do szczegółowego opracowania. Wśród tych pięciu propozycji był system mostów aluminiowych, opracowany przez holenderską firmę architektoniczną Jan Brouwer Associates i konstruktorów z instytutu badawczego TNO w Delft. Choć koncepcja mostów aluminiowych nie wygrała przetargu w Leidschenveen, to jednak powstałe wówczas rozwiązania stały się podstawą dla projektów wielu kolejnych holenderskich mostów z aluminium. Przykładem są konstrukcje dwóch identycznych mostów drogowych, zbudowanych w Helmond w 2000 roku (rys. 12). Kształt tych mostów różni się nieco od projektów dla Leidschenveen, lecz zastosowane elementy konstrukcyjne są takie same. Przęsła mostów o długości 10 m, wykonane zostały w całości w wytwórni i przetransportowane barkami na miejsce wbudowania. Mosty mają dwa pasy ruchu oraz ścieżkę rowerową. Obiekty zostały nagrodzone nagrodą główną Aluminium Award 1999 r., przyznawaną przez europejskie stowarzyszenie European Aluminium Association (EAA).



Rys.12. Widok i konstrukcja mostu Helmond w Holandii
Fig.12. The view and superstructure drawings of Helmond bridge, Holland

Drugim rezultatem przetargu w Leidschenveen było powstanie holenderskiego konsorcjum badawczego, obejmującego łącznie 15 partnerów, w tym producentów wyrobów aluminiowych, wytwórców konstrukcji, przedstawicieli administracji drogowych różnego szczebla i 2 instytuty naukowe. Konsorcjum realizuje obecnie projekt badawczy pn.: „Mosty z aluminium”, mający doprowadzić do wdrożenia i promocji stopów aluminium jako materiału do budowy mostów. Trzyletni projekt, prowadzony przez instytut TNO z Delft, na bazie szczegółowej inwentaryzacji potrzeb i możliwości, zdefiniował 4 podprojekty, których tematem są kolejno: typowe przęsła mostów zwodzonych systemu Groningen, system drogowych mostów modułowych Vinex, metody przebudowy istniejących mostów stalowych z wykorzystaniem stopów aluminium oraz typowe pomosty aluminiowe do wymiany zniszczonych pomostów żelbetowych. Pierwszym efektem programu są nowoczesne konstrukcje aluminiowe mostów zwodzonych systemu Groningen. System obejmuje mosty o rozpiętości przęsła do 18 m i szerokości 12 m. Jednym z ostatnio wybudowanych mostów tego systemu jest otwarty w 2003 r. most Uiverbrug przez Rierkerhaven w Amsterdamie. Jest to pierwszy nowoczesny aluminiowy most zwodzony, którego nośność pozwala na nieograniczony ruch ciężkich pojazdów o masie do 45 ton. Przęsło aluminiowe o długości teoretycznej 13 m i wysokości konstrukcyjnej 0,90 m wykonano z profili wyciskanych o przekroju trapezowym oraz z blach. Przekrój poprzeczny przęsła jest zbliżony do opisanych wcześniej konstrukcji mostów w Helmond. Podobnie jak tamte mosty, obiekt otrzymał w 2003 r. europejską nagrodę Aluminium Award, jako najciekawsza budowla roku wykonana ze stopów aluminium (rys. 13). Obecnie w Holandii trwają prace nad systemem mostów modułowych typu Vinex, przeznaczonych do budowy w nowo powstających osiedlach mieszkaniowych, często poprzecinanych licznymi kanałami, śluzami i polderami. System obejmuje mosty o rozpiętości 8, 12 i 16 m i jest oparty na 3 standardowych rodzajach dźwigarów aluminiowych o przekroju skrzynkowym. Każdy dźwigar ma szerokość 3 m. Dźwigary są łączone wzajemnie bokami przez spawanie, tworząc przęsło o wymaganej szerokości do 12 m łącznie. W ramach programu badawczego oceniono nie tylko wytrzymałość, sztywność i stateczność konstrukcji aluminiowej, lecz także zmęczenie połączeń oraz charakterystyki dynamiczne przęsła. Oprócz aspektów technicznych są analizowane także koszty budowy i utrzymania mostów aluminiowych. Wstępne wyniki programu badawczego wskazują, że stopy aluminium mają w kolejnych latach bardzo dużą przyszłość jako materiał do budowy i modernizacji mostów drogowych [15].

Podobny cel – zbadanie możliwości technicznych i ekonomicznych zastosowania stopów aluminium w mostach drogowych małej i średniej rozpiętości - miał 3-letni program badawczy, zrealizowany w latach 1999 – 2001 na Uniwersytecie Laval w stanie Quebec w Kanadzie [16]. Program został zainspirowany informacjami z sąsiednich Stanów Zjednoczonych, gdzie zastosowanie stopów aluminium w mostach zyskało powtórnie uznanie, a pomosty aluminiowe są uważane za rozwiązanie trwałe, o korzystnym stosunku „koszty – zysk” [17]. Kanadyjski program badawczy obejmował wykonanie wstępnej analizy 49 różnego typu aluminiowych obiektów mostowych, z których w drugim etapie pracy wybrano 9 obiektów do dalszego wymiarowania. Końcowym etapem analizy było wykonanie szczegółowych obliczeń

statycznie – wytrzymałościowych dla 3 obiektów, uznanych za najwłaściwsze pod względem konstrukcyjnym i ekonomicznym. Mosty podzielono na dwie grupy rozpiętości: 15 m (20 mostów) i 35 m (29 mostów). Wszystkie analizowane obiekty miały jednakową szerokość całkowitą równą 11,4 m oraz szerokość użytkową jezdni równą 10,5 m, obejmującą 3 typowe pasy ruchu. Jako najbardziej odpowiednie dla wybranych rozpiętości przyjęto do analizy tylko mosty belkowe, dwu – lub wielodźwigarowe, mające pomost żelbetowy lub aluminiowy. Przeanalizowano sześć różnych typów konstrukcji dźwigarów aluminiowych: dźwigar blachownicowy, kratownicę typu Pratta, kratownicę typu Howa, kratownicę typu Warrena, kratownicę typu Baileya oraz dźwigar łukowy z jezdnią górną. Dla każdego z typów dźwigarów przyjęto następujące układy i rozstawy poprzeczne: 2 dźwigary w rozstawie osiowym 11,4 m, 4 dźwigary w rozstawie osiowym 3 m, 6 dźwigarów w rozstawie osiowym 2 m lub 12 dźwigarów w rozstawie osiowym 1 m. Na dźwigarach założono wykonanie jednego z trzech rodzajów pomostów: płyty żelbetowej grubości 0,20 m, zespolonej z dźwigarami, pomostu aluminiowego systemu Svenssona, nie zespolonego z dźwigarami oraz pomostu aluminiowego typu Alumadeck, zespolonego z dźwigarami [1]. Łącznie w I etapie przeanalizowano 144, różniące się konstrukcyjnie, aluminiowe obiekty mostowe. Wyniki tej analizy odniesiono do obiektu „wzorcowego”: typowego stalowego mostu zespolonego, zalecanego do stosowania przez Ministerstwo Transportu stanu Quebec dla rozpiętości 15 i 35 m.



Rys.13. Most zwodzony Uiverbrug przez kanał Rierkerhaven w Amsterdamie
Fig.13. Uiverbrug movable bridge over Rierkerhaven canal in Amsterdam

W analizie obliczeniowej brano pod uwagę cztery główne kryteria projektowania, bazując na amerykańskiej normie AASHTO [18], tj. w kolejności ich uwzględniania: drgania przęsła, ugięcia przęsła, zmęczenie w połączeniach i wytrzymałość elementów dźwigara. W pierwszym etapie analizy sprawdzono kryterium drgań i ugięć dla wszystkich rozpatrywanych przypadków. Natomiast zmęczenie sprawdzano tylko dla niektórych węzłów, a wytrzymałość jedynie dla pasa dolnego oraz słupków i krzyżulców podporowych. Podczas wymiarowania końcowego wybranych typów mostów (drugi etap analizy) sprawdzono także wytrzymałość pozostałych prętów kratownic, zwiatrowań oraz wszystkich połączeń, łącznie ze sprawdzeniem ich zmęczenia. Jak się okazało w wyniku analizy to właśnie połączenia są krytycznymi elementami konstrukcji, decydującymi nie tylko o jej nośności, ale także o kosztach. Poszczególne przęsła obliczono jako przestrzenne konstrukcje prętowe, natomiast pomost jako ruszt płaski. Analizę obliczeniową wykonano w zakresie liniowym geometrycznie i materiałowo. W obliczeniach uwzględniono jedynie obciążenie ciężarem własnym oraz obciążeniem użytkowym, nie uwzględniając np. działania wiatru, temperatury, itp. Analizę wytrzymałościową przeprowadzono przy założeniu, że konstrukcje przęseł i pomostu wykonano ze stopu aluminium typu 6061-T6 (tabl. 1).

Analizę ekonomiczną przeprowadzono przez porównanie kosztów bezpośrednich, związanych z budową obiektu, tj. kosztów zakupu materiałów, wytworzenia konstrukcji, transportu oraz montażu przęseł na podpory, nie uwzględniając jednak np. kosztów utrzymania, rozbiórki czy recyklingu materiałów. Ponieważ przedmiotem analizy było porównanie różnych typów konstrukcji przęseł, nie uwzględniono kosztów budowy podpór i wyposażenia pomostu. Ceny jednostkowe poszczególnych konstrukcji aluminiowych ustalono na podstawie ofert kilku firm, wykonujących tego typu konstrukcje.

Chociaż przeprowadzona analiza nie uwzględniła wielu ważnych aspektów związanych z stosowaniem stopów aluminium w obiektach mostowych, to pozwoliła na wstępną ocenę kierunków poszukiwań racjonalnych technicznie i ekonomicznie mostowych konstrukcji aluminiowych. Główne wnioski, jakie autorzy wyciągnęli z przeprowadzonej analizy można streścić następująco:

- Przęsła mostów małej i średniej rozpiętości, w których zarówno dźwigary jak i pomost zostały wykonane ze stopów aluminium, nie są rozwiązaniami właściwymi ani z technicznego (konstrukcyjnego) ani z ekonomicznego punktu widzenia. Lekkość konstrukcji powoduje bowiem konieczność znacznego zwiększenia jej sztywności dla spełnienia kryterium dopuszczalnych drgań mostu. Efektem tego działania jest wzrost masy aluminium i związany z tym znaczny wzrost kosztów całej konstrukcji. Dlatego w rozpatrywanym przedziale rozpiętości, tj. dla mostów o przęsłach do 35 m, zastosowanie wyłącznie stopów aluminium do ich budowy jest nieuzasadnione ekonomicznie. Wniosek ten nie ogranicza zasadności zastosowań pomostów aluminiowych w modernizacji istniejących mostów stalowych.
- Duży wpływ na końcowy wynik analizy miał fakt przyjęcia w węzłach dźwigarów połączeń śrubowych zwykłych, jak zaleca norma amerykańska AASHTO [18]. Zastosowanie takich połączeń pociąga za sobą zwiększenie przekrojów

netto elementów, co znacznie wpływa na końcową masę i koszt konstrukcji aluminiowej. Związane jest to z mniejszą niż dla stali, wytrzymałością stopów aluminium na docisk i ścinanie. Dlatego znacznie korzystniejsze, zdaniem autorów analizy, jest zastosowanie w mostach aluminiowych połączeń ciernych na śruby sprężające. Autorzy podkreślają, że ten typ połączeń jest dopuszczony do stosowania w normach europejskich już od 1978 r., a przeprowadzone liczne badania potwierdziły wystarczający zapas nośności i wysoki współczynnik bezpieczeństwa tych połączeń, wymagany w konstrukcjach mostowych.

- Nośność konstrukcji mostowych, obliczona w końcowym etapie analizy, determinowana jest przez wytrzymałość zmęczeniową połączeń. Pomimo przyjęcia przepisów amerykańskich w tym zakresie, autorzy analizy podkreślają duże zróżnicowanie normowego podejścia do problematyki zmęczenia konstrukcji aluminiowych, istniejące w normach i wytycznych kanadyjskich, amerykańskich czy europejskich. Różne są kategorie połączeń i przypisane im krzywe Wöhlera. W tej sytuacji przyjęcie innej normowej procedury obliczeń zmęczeniowych mogłoby doprowadzić do zupełnie innych wniosków. Autorzy postulują dalsze prace w zakresie ujednoczenia normowego ujęcia problematyki zmęczenia w konstrukcjach ze stopów aluminium.
- Wykorzystanie pomostów aluminiowych do modernizacji istniejących mostów stalowych jest działaniem racjonalnym, zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Głównymi czynnikami wpływającymi na racjonalność takich rozwiązań są: ograniczenie zakresu przebudowy podpór i fundamentów, trwałość pomostów ze stopów aluminium, szybkość ich montażu i związane z tym korzyści społeczne oraz uzasadnienie ekonomiczne, wynikające z analizy typu LCC (ang. *life cycle costing*), tj. uwzględniającej koszty poniesione w ciągu całego życia technicznego mostu. Dlatego właśnie pomosty są, zdaniem autorów analizy, najbardziej odpowiednim sposobem wykorzystania stopów aluminium we współczesnym budownictwie mostowym.

Przedstawiona powyżej analiza, której wnioski pozwalają sprecyzować kierunki i obszary badań nad stosowaniem stopów aluminium w mostach, ma jednak wiele ograniczeń powodujących konieczność zachowania pewnej rezerwy przy kierowaniu się jej wynikami. Podstawowe z tych ograniczeń wskazali już autorzy analizy: założenie śrubowych połączeń zwykłych oraz nie do końca zweryfikowane zasady obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej. Połączenia sworzniowe pracujące na docisk i ścinanie były stosowane w konstrukcjach mostowych ze stopów aluminium w latach 60. Od tego czasu wszystkie mosty aluminiowe jakie wykonano, miały połączenia spawane lub śrubowe cierne. Powodem wyeliminowania nitów i śrub zwykłych była ich niska wytrzymałość zmęczeniowa oraz konieczność zwiększania przekrojów netto łączonych elementów. Dlatego wydaje się niezrozumiałe przyjęcie takich połączeń we współczesnej analizie techniczno – ekonomicznej.

Poza ograniczeniami analizy, wskazanymi przez jej autorów, istnieje jeszcze kilka aspektów, których uwzględnienie znacznie zmieniłoby jej wynik. Pierwszym z nich jest szacowanie tylko kosztów bezpośrednich, bez pełnej analizy typu LCC, mającej decydujące znaczenie przy uzasadnieniu celowości stosowania stopów aluminium w mostach. I chociaż autorzy analizy zaznaczają, że ich celem było jedynie porównanie

różnych rodzajów mostów z aluminium, to jednak końcowy wniosek wyciągają z porównania najlepszego ekonomicznie rozwiązania do wzorcowego mostu zespolonego, stalowo - betonowego. Przy obecnych światowych cenach aluminium, takie porównanie zawsze wykaże co najmniej 50% różnicę w kosztach bezpośrednich na korzyść mostu zespolonego, co wykazali także autorzy analizy. Jednakże, gdy uwzględnimy sumę kosztów w czasie życia technicznego mostu, wniosek może być zupełnie inny. Potwierdzają to cytowane powyżej prace amerykańskie, niemieckie lub holenderskie. Potwierdzają to także autorzy omawianej analizy, jednakże tylko w odniesieniu do pomostów aluminiowych.

Kolejnym ograniczeniem omawianej analizy jest położenie środka ciężkości na mosty o konstrukcji kratownicowej. Jak wskazuje bowiem porównanie przeprowadzone w p. 3 niniejszej pracy, kratownice aluminiowe stosowane były dotychczas zazwyczaj w mostach zwodzonych oraz mostach wiszących dużej rozpiętości, gdzie miało to uzasadnienie z uwagi na konieczność minimalizacji ciężaru własnego przęsła. Przyjęcie kratownic jako systemowego rozwiązania dla mostów drogowych małej i średniej rozpiętości nie wydaje się najwłaściwsze, głównie z uwagi na przekroczenie dopuszczalnego kryterium drgań, związane z lekkością konstrukcji oraz zmęczeniem elementów w węzłach. W tym kontekście słusznym wydaje się jeden z wniosków analizy kanadyjskiej, uznający blachownicowy dźwigar pełnościenny za najwłaściwszy rodzaj dźwigara aluminiowego do zastosowań mostowych. I chociaż analiza mostu blachownicowego z pomostem żelbetowym została zakończona przez autorów na etapie wstępnym, to jej wyniki potwierdzają zasadność kontynuacji prac w tym zakresie. Szczególnie, gdy założymy wykonanie dźwigarów ze stopu grupy 5000, który jest bardziej odpowiedni do takich zastosowań (wytrzymałość, spawalność, zmęczenie, itp.), niż przyjęty w analizie kanadyjskiej stop 6061-T6.

5. PERSPEKTYWY STOSOWANIA STOPÓW ALUMINIUM DO BUDOWY I UTRZYMANIA MOSTÓW

Od kilkunastu lat całkowita ilość aluminium stosowanego w budownictwie kształtuje się na stałym poziomie. Jednakże wzrastająca w wielu krajach potrzeba przebudowy istniejącej infrastruktury drogowej może zmienić tę sytuację. Coraz więcej obiektów mostowych wymaga pilnej lub natychmiastowej przebudowy. Wymiana starych pomostów i/lub dźwigarów mostów na aluminiowe, bez ingerencji w fundamenty czy korpusy podpór może wygenerować znaczący rynek dla blach i profili aluminiowych. Aluminium pozwoli administratorom drogowym wydłużyć życie techniczne mostów, a przez to zaoszczędzić miliony dolarów. Sama operacja wymiany zostanie wykonana w ciągu kilku dni, a nie jak dotychczas miesięcy, co znacząco zredukuje ograniczenia i utrudnienia dla użytkowników dróg i obniży koszty społeczne remontów i modernizacji. W najbliższych latach zapowiada się także rozwój mostowych konstrukcji aluminiowych, odpornych na trzęsienia ziemi. Redukcja sił bezwładności, a co za tym idzie rozmiarów zniszczeń obiektów mostowych podczas trzęsień ziemi, dzięki zastosowaniu lekkich konstrukcji z aluminium, jest już dzisiaj przedmiotem wielu badań. Stopy aluminium będą nadal znaczącym materiałem zarówno dla cywilnych jak i

wojskowych obiektów mostowych. Długo zapowiadane zastąpienie aluminium przez tytan lub kompozyty polimerowe jeszcze się nie zmaterializowało, ponieważ materiały te nie są tak efektywne ekonomicznie jak aluminium, a ich trwałość i zdolność do naprawy, szczególnie dla kompozytów, jest trudna do przewidzenia. Wraz z poznawaniem ich trwałości będzie miało miejsce coraz szersze stosowanie tych materiałów, lecz długo jeszcze względy ekonomiczne zapewnią kontynuację znaczącej roli aluminium. Na świecie obserwuje się obecnie duży wzrost zużycia aluminium w trzech gałęziach gospodarki: przemyśle samochodowym, lotniczym oraz budownictwie infrastrukturalnym. Wzrost zużycia i znaczenia aluminium wydaje się być zapewniony przez jego wysoką wartość zarówno dla producentów jak i konsumentów. W rezultacie trwałe stopy aluminium są i będą jeszcze przez długie lata doskonałym materiałem konstrukcyjnym, zarówno dla samochodów, samolotów, jak i obiektów infrastruktury drogowej.

Konieczność zwiększania efektywności konstrukcyjnej przez zmniejszanie ciężaru budowli prowadzi do stałego rozwoju stopów aluminium, co zostało osiągnięte przez nowe procesy technologiczne i metalurgiczne, takie jak podwójne starzenie, starzenie rewersyjne czy kontrolowana kombinacja podgrzewania oraz walcowania pomiędzy hartowaniem i starzeniem. Dzięki takim technologiom oraz ścisłej kontroli składu chemicznego stopów, znacznie zwiększono wytrzymałość, trwałość oraz odporność korozyjną stopów aluminium. Dzisiejsze stopy są 1,5 razy mocniejsze niż stopy z połowy XX wieku oraz, uwzględniając inflację, mają ten sam koszt. W ciągu ostatniej dekady zostało wynalezionych kilka nowych materiałów konstrukcyjnych, bazujących na aluminium. Wśród nowych stopów aluminium podstawowe znaczenie wkrótce będą miały stopy typu aluminium-lit [19]. Nad doskonaleniem i przemysłową produkcją tych stopów światowy przemysł aluminium pracował ponad 35 lat. Zostały one opracowane dla lotnictwa i kosmonautyki w celu zmniejszenia masy statków powietrznych, dla których stosuje się materiały o takich właściwościach jak: mała gęstość, a przy jednocześnie dużym module Younga, duża wytrzymałość i dobra spawalność. Stopy aluminium z litem mają te cechy. Lit jest najlżejszym metalem. Gęstość właściwa aluminium wynosi $2,7 \text{ g/cm}^3$, natomiast litu $0,534 \text{ g/cm}^3$. Dodanie 1 % litu do aluminium zmniejsza gęstość stopu około 3 % i zwiększa moduł sprężystości około 5 %. Stopy aluminium-lit są obecnie wykorzystywane także do innych celów, ze względu na doskonałą odporność zmęczeniową oraz udarność kriogeniczną (zdolność do odkształceń plastycznych w bardzo niskich temperaturach), bez naruszenia spójności materiału. Taki materiał konstrukcyjny jest bardzo interesujący dla budownictwa mostów, szczególnie o dużej rozpiętości. Wynaleziono już szereg odmian stopów aluminium-lit, które nazwano „Weldalite 049”. Do tej rodziny stopów należą opatentowane w 1990 r. stopy AA 2094 i AA 2095 o bardzo dużej wytrzymałości na rozciąganie (do 690 MPa). W latach 1992-93 zostały opatentowane stopy Weldalite AA 2195 i AA 2096, które charakteryzują się korzystnymi kombinacjami stosunku wytrzymałość/udarność oraz gęstość. Stop AA 2195 produkcji firmy Alcoa Co. uznaje się obecnie za najbardziej udany z tej grupy. Równoległe z pracami nad stopami spawalnymi o dużej wytrzymałości, doskonalono stopy aluminium-lit o małej gęstości i dużej udarności, stosowanymi do produkcji grubych blach. W rezultacie w 1993 r. opatentowano stop AA 2197,

który nie należy do rodziny stopów Weldalite. Ma większą wytrzymałość zmęczeniową, większą sztywność i mniejszą gęstość niż stopy Weldalite (z wyjątkiem AA 2096). Stop jest stosowany do produkcji grubych blach, z których są wykonywane elementy samolotów myśliwskich F16. Elementy z tego stopu są 5 % lżejsze oraz 7 % sztywniejsze niż poprzednio używane i mają doskonałą odporność na zmęczenie. Wszystkie wymienione stopy są produkowane na skalę przemysłową. Można z nich wykonywać elementy konstrukcyjne jak z konwencjonalnych stopów aluminium. W chwili obecnej barierą zastosowania tych stopów w budownictwie jest koszt, lecz w niedługim czasie mogą one być doskonałym materiałem konstrukcyjnym do budowy dużych obiektów mostowych.

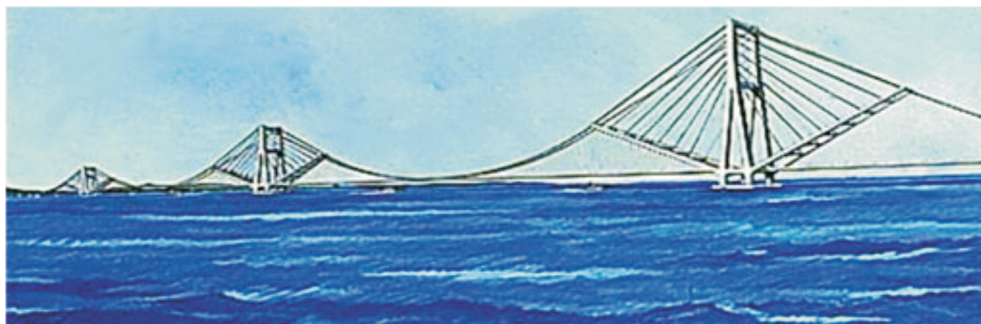
Oprócz udoskonalonych stopów aluminium tworzone są także nowe odmiany kompozytów typu MMC (ang. *Metal Matrix Composites*), w których rolę matrycy spełnia aluminium. Powstają one w celu uzyskania materiałów o gęstości nie większej niż ma aluminium, ale o lepszych cechach wytrzymałościowych, zaprogramowanych odpowiednio do potrzeb konstrukcji [20]. Wśród tych kompozytów można znaleźć materiały nadające się do wykonania specjalnych elementów mostowych np. fragmentów konstrukcji narażonych na intensywną abrazję lub bardzo silnie obciążonych łożysk. Przykładem takiego kompozytu na bazie aluminium jest materiał o nazwie DRA (ang. *Discontinuously Reinforced Aluminum*), wynaleziony ostatnio w USA [21]. Kompozyt ma matrycę ze stopu aluminium AA 6092 i może być zbrojony w sposób nieciągły, za pomocą płatków lub krótkich włókien z mocnego, sztywnego materiału ceramicznego, jak np. tlenek glinowy lub węgiel krzemu (karborund). DRA jest materiałem izotropowym, wielokierunkowo przydatnym, o wyjątkowej kombinacji wytrzymałości i sztywności. Jego właściwości materiałowe można łatwo dostosować do specjalnych wymagań, wykorzystując technologie obróbki stosowane do konwencjonalnych stopów aluminium. Kompozyt jest odporny na ścieranie i korozję, może być także anodowany. Granica plastyczności DRA wynosi od około 350 do ponad 560 MPa, a moduł Younga odpowiednio od około 98 do 122 GPa. Ocenia się, że trwałość elementów wykonanych z kompozytu DRA jest dwukrotnie większa niż z dotychczas stosowanych materiałów. Kompozyty DRA są obecnie szeroko stosowane w wielu dziedzinach, jak np.: w lotnictwie, przemyśle maszynowym i samochodowym oraz w elektronice. DRA zastępuje w nich tytan, konwencjonalne stopy aluminium oraz kompozyty z matrycami organicznymi. Kolejnym ciekawym kompozytem typu MMC, który już niedługo może mieć zastosowanie w mostach jest BORALYN. Matryca ze stopu aluminium serii 6000 lub 7000 jest zbrojona w 15 % cząstkami węgla czteroboru (B_4C) [22]. Kompozyt jest produkowany przez izostatyczne prasowanie na zimno mieszaniny sproszkowanego stopu aluminium i B_4C . Uzyskane w ten sposób kęsy kompozytu są przerabiane w produkty metodą wyciskania, kucia, odlewania lub walcowania. Sztywność elementów konstrukcyjnych z BORALYNU jest o 40 % większa niż ich odpowiedników z tytanu lub stali. Wytrzymałość materiału zależy od rodzaju użytego stopu aluminium oraz od sposobu jego obróbki cieplnej. Regulację odkształceń uzyskuje się hartując kompozyt w wodzie lub glikolu. Dla uzyskania dużej wytrzymałości jest on poddawany starzeniu. Cykl starzenia jest podobny jak w przypadku konwencjonalnego stopu aluminium, lecz wymaga znacznie krótszego czasu. Współczynnik rozszerzalności

cieplnej można zmniejszyć, zwiększając dodatek węgla B_4C . W ten sposób można BORALYN dostosować do współpracy z wieloma innymi materiałami, w tym np. ze stałą. Kompozyt można spawać, stosując technologie używane do stopów aluminium, a przy tym węgiel B_4C minimalizuje zjawisko kruchości spawalniczej, zapewniając dużą wytrzymałość zmęczeniową połączeń spawanych. Kompozyt jest lekki, gdyż gęstość właściwa węgla B_4C jest mniejsza niż aluminium - wynosi $2,5 \text{ g/cm}^3$. Współczesna opłacalność stosowania kompozytów MMC wynika z kalkulacji kosztów typu LCC, uwzględniającej długość życia użytkowego elementów wykonanych z tego kompozytu. Zatem szersze wprowadzenie analiz typu LCC do budownictwa mostowego otworzy drogę do stosowania w nim także kompozytów z matrycą z aluminium.

Wraz z rozwojem nowych wysokowytrzymałych materiałów o małej gęstości właściwej, mosty będą stawały się coraz smuklejsze i lżejsze, zwłaszcza mosty o dużej długości, projektowane coraz częściej jako stałe przeprawy ponad wielkimi cieśninami morskimi. Wiele bardzo ważnych dla rozwoju ogólnoswiatowego transportu przepraw jest dopiero w planach. W tych planach, w kilku przypadkach, rozważane jest zastosowanie stopów aluminium w konstrukcjach przęseł dużych mostów. Jedną z najbardziej spektakularnych konstrukcji była koncepcja mostu łączącego Europę z Afryką nad Cieśniną Gibraltarską (rys. 14). Pomost tego mostu planowano wykonać ze stopu aluminium. I chociaż ostatecznie wybrano do realizacji tunel pod cieśniną, w kolejnych tego typu koncepcjach wielkich mostów, aluminium coraz częściej jest proponowane jako jeden z materiałów konstrukcyjnych. Przykładami takich inwestycji są m.in. przeprawa messyńska we Włoszech, przeprawa Mallaca pomiędzy Malezją i Indonezją czy most nad rzeką La Plata, który połączy Argentynę z Urugwajem. Inną formą przyszłościowego wykorzystania stopów aluminium są np. pływające drogi, które już dzisiaj uzupełniają tradycyjną infrastrukturę transportową w Holandii (rys. 15). Lekkość i trwałość zastosowanego stopu aluminium pozwoliły na stworzenie modułowej konstrukcji jezdnej, umożliwiającej szybki i zrównoważony, tj. zgodny z wymaganiami środowiska, rozwój sieci drogowej w kraju, którego ponad 20 % powierzchni pokrywa woda.

Niedaleka przyszłość pokaże szeroki wachlarz nowych, ultrawytrzymałych i trwałych materiałów konstrukcyjnych. Czeka nas stałe doskonalenie projektowanych „na miarę” właściwości materiałowych poprzez weryfikowane doświadczalnie modelowanie numeryczne i procesy symulacyjne. Większość elementów konstrukcyjnych „inteligentnych mostów przyszłości” będzie produkowana z nowych materiałów konstrukcyjnych, takich jak ultra lekkie metale, nano-materiały, materiały wielofunkcyjne czy materiały inteligentne. Zredukowany zostanie znacznie czas od pomysłu na nowy materiał do jego praktycznego wdrożenia - przez zastosowanie modelowania numerycznego, symulacji i skalowania na podstawie prostych eksperymentów, z wykorzystaniem np. sztucznych sieci neuronowych. Bardziej wiarygodne sposoby analizy kosztów, jak np. LCC, uzasadnią opłacalność wytwarzania nowych materiałów, zanim zapadnie ostateczna decyzja o rozpoczęciu fazy badań czy produkcji. Nowe materiały konstrukcyjne znacznie rozszerzą horyzonty i poszerzą wybór inżynierom mostowym, chcącym projektować duże, wytrzymałe, estetyczne, trwałe i funkcjonalne obiekty. Cykl rozwoju produktu będzie stawał się coraz krótszy, wymagając pełnej integracji

faz projektowania, badań, wdrożenia i produkcji. Produkty finalne będą zarówno doskonale materiałowo, jak również powszechnie dostępne. To jest wizja „inteligentnych mostów przyszłości”, w której aluminium i jego stopy będą mieć bardzo znaczący udział.



Rys.14. Koncepcja stałego połączenia Europy i Afryki nad Cieśniną Gibraltarską
Fig.14. A conception of fixed crossing between Europe and Africa over Gibraltar



Rys.15. Aluminiowa pływająca droga w Holandii
Fig.15. The aluminium floating road in Holland

6. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione powyżej przykłady historycznych i współczesnych mostów aluminiowych wskazują, że stopy aluminium mogą stanowić dzisiaj cenną alternatywę dla betonu i stali w budownictwie mostowym. W okresie ponad 70 lat stosowania w mostach, aluminium było wykorzystywane głównie w mostach zwodzonych, kładkach dla pieszych oraz w przebudowie i modernizacji przeseł mostów istniejących. Stopień zainteresowania tym materiałem konstrukcyjnym związany był zazwyczaj z jego aktualną ceną w stosunku do ceny stali. Ostatnie dziesięciolecie pokazało jednak, że nawet przy stosunkowo wysokiej cenie stopów aluminium, mogą one być w niektórych przypadkach najkorzystniejszym rozwiązaniem materiałowym. Wpływają na to głównie lekkość i trwałość konstrukcji aluminiowych oraz ekonomiczność ich stosowania, liczona w ciągu całego życia technicznego konstrukcji (LCC). Stale rosnące możliwości producentów wyrobów aluminiowych w zakresie wielkości przekrojów wyciskanych oraz coraz lepsze metody łączenia elementów, np. FSW (ang. *Friction Stir Welding*), w połączeniu ze współczesnymi osiągnięciami metalurgii aluminium, już wkrótce pozwolą na budowę bardzo dużych mostów. Dlatego wydaje się uzasadnione zainteresowanie polskiego środowiska mostowego szerszym wykorzystaniem aluminium w mostach budowanych w Polsce. Tym bardziej, że istnieją krajowi producenci wyrobów aluminiowych, zarówno profili wyciskanych jak i blach walcowanych, zdolni do wytworzenia każdej zaprojektowanej konstrukcji budowlanej. Wprawdzie, poza jedną kładką dla pieszych [23], nie zbudowano dotychczas w kraju obiektu mostowego ze stopów aluminium, lecz prace naukowe prowadzone m.in. na Politechnice Rzeszowskiej wskazują jednoznacznie na możliwość i realność takich realizacji [1, 2, 24].

Cechy współcześnie produkowanych udoskonalonych stopów i kompozytów aluminiowych wykraczają poza dotychczasowe potrzeby budownictwa mostowego. Także koszt tych materiałów jest daleko poza ekonomicznością ich stosowania w konstrukcjach mostowych. Jednak jak uczy historia, zawsze dziedziny przodujące na danym etapie rozwoju techniki wskazują horyzonty możliwości innym dziedzinom, a relacje kosztów z upływem czasu zwykle zmieniają się na korzyść rozwiązań innowacyjnych. Można się spodziewać, że budownictwo mostowe sięgnie do stopów aluminium opracowanych dla lotnictwa i kosmonautyki, jak to miało miejsce w przypadku kompozytów. Okazją będzie realizacja marzeń wybitnych konstruktorów, np. budowa wspomnianych przepraw mostowych, które, jak wskazują studia przedprojektowe, wymagają zastosowania przęsła o rozpiętości rzędu 3500 do 5000 m. Dlatego mimo jeszcze małej przydatności dziś w budownictwie mostowym szczytowych osiągnięć metalurgii aluminium, warto wiedzieć jakie stwarza ona perspektywiczne możliwości dla mostownictwa [25].

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Siwowski T.*: Wykorzystanie pomostów aluminiowych do modernizacji mostów. Inżynieria i Budownictwo, **LVIII**, nr 3-4, 154-159, 2002
- [2] *Siwowski T.*: Wykorzystanie stopów aluminium do budowy kładek dla pieszych. Materiały z V Krajowej Konf. Naukowo - Technicznej „Problemy projektowania, budowy i utrzymanie mostów małych i średnich rozpiętości”, 366-375, Wrocław 2004
- [3] *Davies R. M.*: Aluminium in konstruktiven Ingenieurbau Großbritanniens. Aluminium, Jahrgang 38, Heft 2, 98-109, 1962
- [4] *Trynidad A.A.Jr.*: Aluminum bridges - a historical perspective. Proceedings of the bridge session of the 1994 ALUMITECH Conference in Atlanta. The Aluminum Association, 1-6, Washington D.C. 1994
- [5] *Bölskey E., Haviar G.*: Eine Aluminiumbrücke in Szabadszállás. Bauplanung – Bau-technik, Jahrgang 9, Heft 5, 191-197, 1955
- [6] *Westhaus K.H., Pantel R., Hintz W.*: Die erste deutsche Strassenbrücke aus Aluminium. Aluminium, Jahrgang 32, Heft 8, 466-475, 1956
- [7] *Ashton N. L.*: First welded aluminum girder bridge spans Interstate Highway in Iowa. Civil Engineering, **28**, No. 10, 79-80, 1958
- [8] *Domke H.*: Neue Aluminiumbrücken in den Vereinigten Staaten. Aluminium, Jahrgang 35, Heft 2, 92-94, 1959
- [9] *Sedlacek H.*: Aluminium für tragende Konstruktionen in Ingenieurbau. Der Bauingenieur, Jahrgang 42, Heft 4, 117 – 123, Heft 5, 182 – 188, 1967
- [10] *Gönner P.*: Geschweißte Fußgänger und Fahrbahnbrücken aus Aluminium. Schweißen und Schneiden, Jahrgang 20, Heft 9, 424 – 430, 1968
- [11] *Lwow J.S.*: Projektirwanije i postrojka aluminiowego mosta. Transportnoje Stroitelstvo, **15**, nr 4, 11-14, 1965
- [12] *Paubel R.*: Le Pont Suspendu de Montmerle. Revue de l'Aluminium, 51, No July – August, 390-403, 1974
- [13] *Kosteas D.*: Aluminium potential in bridge construction - materials and designs tools. The proceedings of the bridge session of the 1994 ALUMITECH Conference in Atlanta

- „Aluminum’s potential: bridge construction”, The Aluminum Association, 19-67, Washington D.C. 1994
- [14] *Kavale I., Vallestad I.J., Solaas K.*: Forsmo bridge – the first aluminium road bridge in Norway. Proceedings of the bridge session of the 1997 ALUMITECH Conference in Atlanta, The Aluminum Association, 1-5, Washington D.C. 1997
- [15] *Soetens F., Van Hove B.W.E.M., Mennik J.*: Aluminium bridges in the Netherlands. Proceedings of the International Conference on Joints in Aluminium, INALCO 2001, 273-280, Munich 2001
- [16] *Roy C., Beaulieu D., Bastien J.*: Utilisation d’éléments structuraux en aluminium dans les ponts routiers : Étude économique et structurale. Canadian Journal of Civil Engineering, **28**, Nr 6, 1029-1040, 2001
- [17] *Wright W.*: Building the bridge to the 21-st century with ... aluminium? Public Roads, **61**, 30-33, Spring 1997
- [18] AASHTO. LRFD bridge design specifications. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington, D.C., 1994
- [19] *Fielding P.S., Wolf G.J.*: Aluminum-lithium for aerospace. Advanced Materials & Processes, **149**, No. 10, 21-23, 1996
- [20] *Kevorkijan V.M.*: Aluminum-base composites. Advanced Materials & Processes, **155**, No. 5, 27-29, 1999
- [21] *Maruyama B.*: Progress & promise in aluminum composites. Advanced Materials & Processes, **155**, No. 6, 47-50, 1999
- [22] P/M aluminum/ B₄C composite is 40 % stiffer than titanium. Advanced Materials & Processes, **149**, No. 10, 8, 1996
- [23] *Barabach S., Glomb J., Pyster J.*: Spawany most aluminiowy. Inżynieria i Budownictwo, **XXIV**, 2, 52-55, 1968
- [24] *Siwowski T.*: Badania pomostu aluminiowego pod obciążeniem statycznym. Materiały z XLIX Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZiTB, Tom V, 125-132, Warszawa - Krynica 2003
- [25] *Jarominiak A.*: Perspektywy stosowania aluminium w budownictwie mostowym. Inżynieria i Budownictwo, **LVII**, nr 9, 2001

ALUMINIUM ROAD BRIDGES - PAST, PRESENT AND FUTURE

Abstract

Aluminium has been used as a bridge construction material since 1933. Since over 70 years a tens of various types of bridges have been built and/or rehabilitated with aluminium worldwide. The main reasons for utilisation of aluminium in bridges are such advantages of Al-alloys as: high durability, low weight, huge possibilities of shaping, extrudability, easy production, transport and construction, recycling, and so on. Contemporary progress of material engineering has lead to creation of the new generation aluminium alloys with excellent strength and enhanced durability. It has enabled the wider application of aluminium, also in transport infrastructure. Nowadays, several fields of bridge engineering can be identified in which the aluminium alloys are applicable. There are: aluminium decks for modernisation of existing bridges, superstructures of military bridges, footbridges and new road bridges. This last field of application is the main subject of the paper, in which history, the present time and future perspectives of aluminium road bridges have been presented.