

dr inż. Rafał Krzywoń*
Ing. Roberto Greppi**

Kompozyty zbrojone splotami ze stali wysokiej wytrzymałości

Composites reinforced with use of ultra-high strength steel

W budownictwie kompozyty zbrojone włóknami wysokiej wytrzymałości coraz częściej zastępują stałe konstrukcyjne. Sprzyjają temu ich zalety, takie jak: niewielka masa towarzysząca stosunkowo dużej wytrzymałości i sztywności, duża odporność zmęczeniowa oraz odporność na korozję. Wprawdzie inwestorów odstrasza koszt tego typu materiałów, ale można go skutecznie ograniczać, racjonalizując sposób ich wykorzystania. Współczesny rynek daje możliwości wyboru wśród różnych rodzajów włókien. Nie zawsze konieczne jest stosowanie najdroższych włókien węglowych, tym bardziej że podobne właściwości mają stałe bardzo wysokiej wytrzymałości (ang. *Ultra High Tensile Strength Steel*).

Właściwości kompozytów zbrojonych stalą UHTS

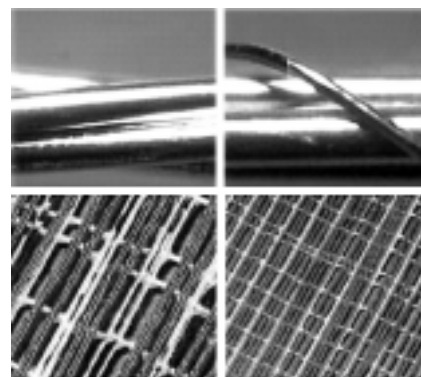
Stale stosowane jako zbrojenie taśm kompozytowych typu SRP (ang. *Steel Reinforced Polymer*) i SRG (ang. *Steel Reinforced Grout*) mogą osiągać wytrzymałość 5000 MPa. Tak dobre właściwości mechaniczne uzyskuje się przez odpowiedni dobór składu chemicznego oraz obróbkę cieplną i mechaniczną pozwalającą zbudować strukturę krystaliczną stali perlitycznej. Tego typu stałe zawierają 0,8 – 0,96% węgla. Stal w postaci drutów poddaje się obróbce ciągnięcia do osiągnięcia średnicy 0,20 – 0,35 mm. W trakcie tego procesu ziarna lub pojedyncze kryształy stali w strukturze perlitycznej są układane zgodnie kierunkiem ciągnięcia, wzdłuż drutu. Dzięki kontroli odległości płytek perlitu możliwe jest zwiększenie naprężeń ciągnięcia i w konsekwencji lepsze ułożenie płytek. Wraz z redukcją grubości i rozstawu płytek cementytu w kierunku ciągnięcia powstaje struktura włóknista, natomiast w przekroju prostopadłym ziarna perlitu układają się w półkola. Cienkie płytki cementytu w stali zapewniają jej bardzo dobrą deformowalność plastyczną. Możliwość umocnienia zgniotowego stali eutektoidalnych jest większa niż stali niskowęglowych. Stałe takie mają nie tylko wysoką wytrzymałość, ale także dobrą ciągliwość.

Drugim z elementów decydującym o dobrych właściwościach jest średnica drutów. Im jest ona mniejsza, tym łatwiejsza obróbka i lepsze jej efekty. W przypadku drutów średnicy 40 µm dotychczasowe techniki ciągnięcia pozwalają na produkcję konstrukcyjnych stali perlitycznych wytrzymałości do 6000 MPa. Właściwości mechaniczne kompozytów zbrojonych włóknami wysokiej wytrzymałości zależą w dużej mierze od współpracy włókien zbrojenia z otaczającą je matrycą. Gładka powierzchnia pojedynczych drutów stalowych oraz ich niewielka sztywność nie zapewniają wystarczającej przyczepności, przez co mogłoby dochodzić do niepożąda-

nego wyslizgnięcia się drutów z matrycy. Wprawdzie zjawisko to nie jest tak niebezpieczne, jak w typowym kompozycie zbrojonym włóknami, o ograniczonej długości, gdyż zbrojenie stalą przebiega w sposób ciągły. Znaczącą poprawę przyczepności łatwo uzyskać, stosując sploty kilku drutów (analogicznie jak sploty stosowane jako ciągną w strunobetonie). Wadą wzajemnego skręcenia drutów w splotcie jest nieznaczne pogorszenie właściwości mechanicznych, dlatego często dodaje się dodatkowy drut, który służy poprawie przyczepności oraz scala pozostałe druty, przez co można stosować nieco mniejsze ich wzajemne splecenie (stosowanie prostych drutów nie jest wskazane, gdyż wykluczałoby ich wzajemną współpracę). Aplikacja pojedynczych ciągnien byłaby niezwykle żmudna, dlatego łączy się je w maty, zatapiając w siatce z tworzywa sztucznego zbrojonego włóknem szklanym. Zasady stosowania tak połączonych splotów są podobne do aplikacji typowych mat z włókien wysokiej wytrzymałości. Istnieje możliwość ich dopasowania do konstrukcji, a nawet gięcia bez niebezpieczeństwa rozseparowania zbrojenia. Zależnie od wymaganych właściwości mechanicznych można zmieniać zagęszczenie ciągnien. W odróżnieniu od większości mat włóknistych, ciągną można rozmieszczać nawet w rozstawie 6 mm, co pozwala na zatapianie maty nie tylko w spoiwach organicznych (np. żywice epoksydowe), ale także w modyfikowanych zaprawach nieorganicznych (fotografia 1).

W celu ochrony przed korozją, a często również poprawy przyczepności powierzchniowej, druty mogą być powlekanie cienką powłoką mosiądzu lub cynku. Mosiądzowanie pozwala nawet pięciokrotnie poprawić przyczepność do matrycy na bazie żywic poliestrowych, winylowych i epoksydowych. Cynkowanie jest zalecane w przypadku wymagania zwiększonej odporności na korozję. Dzięki właściwościom stali ciągliwość kompozytów SRP jest lepsza niż większości

„tradycyjnych” zbrojonych włóknami wysokiej wytrzymałości. Stosowane włókna stalowe są ciągłe, dzięki czemu nie ma specjalnych wymagań dotyczących jakości matrycy, której główną rolą jest ochrona włókien przed czynnikami zewnętrznymi. Dzięki temu, że matryca nie musi przenosić sił stycznych pomiędzy włóknami, możliwe jest stosowanie stosunkowo dużych rozstawów splot-



Fot. 1. Przykładowe sploty oraz maty o różnym zagęszczeniu

Fot. Fidia s.r.l.

* Politechnika Śląska

** Fidia s.r.l., Włochy, Perugia

tów. Pozwala to zastąpić matryce polimerowe modyfikowanymi zaprawami cementowymi, których zaletą jest m.in. większa odporność na podwyższoną temperaturę. Zastosowanie matryc cementowych ma jeszcze jedną zaletę. Powierzchnie, na które aplikuje się wzmacnienie, muszą być równe, pozbawione wgłębień i wybrzuszeń. Zazwyczaj wzmacniane są stare konstrukcje, które często mają nierówną powierzchnię i liczne uszkodzenia. Kleje epoksydowe nie mogą być nakładane zbyt grubo, dlatego wzmacnienie musi być poprzedzone reprofilacją powierzchni. W systemach SRG modyfikowana polimerami zaprawa cementowa może stanowić jednocześnie środek do reprofilacji i matrycę kompozytu.

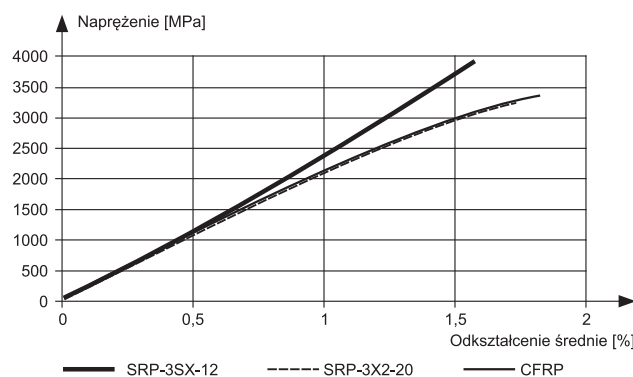
Kompozyty typu SRP/SRG pozwalają zachować część zalet tradycyjnej stali przy jednoczesnym zapewnieniu właściwości wytrzymałościowych i łatwości aplikacji nowoczesnych kompozytów zbrojonych włóknami wysokiej wytrzymałości (tabela). Bazujące na spłotach stalowych mają ciężar kilkukrotnie mniejszy niż odpowiadające im nośnością nakładki stalowe, zbliżony do kompozytów zbrojonych włóknami szklanymi. Ustępują pod tym względem jedynie kompozytom z włókien węglowych.

Sploty UHTS zachowują się w sposób podobny do cięgien stosowanych jako zbrojenie konstrukcji sprężonych, nie występuje pozioma półka na granicy plastyczności oraz wzmacnienie poprzedzone plastycznym płynięciem, a zniszczenie przez zerwanie poprzedzone jest jedynie wyraźnym spadkiem modułu sprężystości.

W przypadku wzmacnień kompozytowych ważna jest przyczepność do podłoża. Częstą formą zniszczenia, zwłaszcza przy niepoprawnym zakotwieniu, jest delaminacja nakładki kompozytowej. Dotychczasowe badania [1] wykazują, że pomimo niekorzystnie większej grubości delaminacja występuje, podobnie jak w przypadku wzmacnień CFRP, w wyniku ścięcia w warstwie podłoża betonowego.

Porównanie właściwości stali oraz najpopularniejszych rodzajów kompozytów

Materiał	Moduł sprężystości E [MPa]	Gęstość [kg/mm ³]	f _{vd} [MPa]	f _u [MPa]	ε _u [%]
Stal (B500)	206 000	7 850	430	500	> 20
SRP (3SX-12)	143 000	7 500	–	2 400	6
GFRP	65 000	2 600	–	1 700	2,8
CFRP	230 000	1 820	–	3 430	1,5
AFRP	105 000	1 440	–	2 800	2,7



Porównawcze wyniki badań rozciągania mat SRP oraz maty CFRP

wego. Jednocześnie efektywna długość zakotwienia nakładki typu SRP musi być ok. 25% większa niż analogicznych wzmacnień CFRP. Przyczepność kompozytu typu SRG (matryca cementowa) jest zdecydowanie gorsza, sama delaminacja zazwyczaj następuje w strukturze kompozytu, natomiast efektywna długość zakotwienia powinna być 3-krotnie dłuższa niż kompozytów przyklejanych żywicami epoksydowymi.

Przykłady zastosowania

Podobnie jak materiały FRP, także kompozyty typu SRP główne zastosowanie w budownictwie znajdują we wzmacnianiu konstrukcji betonowych i murowych. Są to wzmacnienia płyt, belek (w tym sprężonych dźwigarów mostowych), wieńców, słupów, węzłów w konstrukcjach ramowych (fotografia 2), ścian, zespolenia ścian warstwowych.

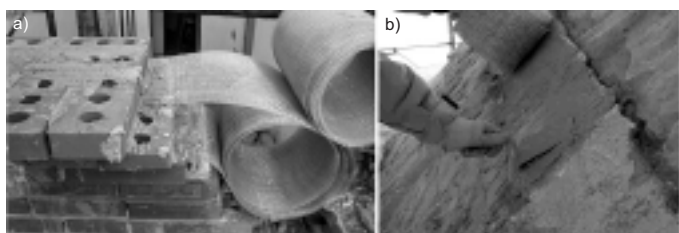


Fot. 2. Przykład zastosowania kompozytów SRP do wzmacniania konstrukcji betonowych

Fot. Fidia s.r.l.

Sposób aplikacji odpowiada ogólnym zasadom metody „wet lay up” stosowanej w przypadku innych kompozytów. Na odpowiednio przygotowane (reprofilowane) podłoże rozwałkowane jest warstwę szepną żywicy epoksydowej, a następnie nakładana jest mata SRP (zazwyczaj uprzednio nasączona żywicą epoksydową). Po wstępnym przyklejeniu na powierzchni nakładki rozwałkowane jest żywicę aż do pełnego jej nasączenia. W celu poprawy przyczepności ewentualnych warstw wykończeniowych i ochronnych (farby, tynki) ostatnia warstwa żywicy może zawierać uszorstniającą domieszkę gruboziarnistego piasku. Z uwagi na średnicę stalowych splotów, nieporównywalnie większą od średnicy przekroju włókien wykorzystanych w większości mat typu FRP, możliwość kształtowania nakładek SRP jest utrudniona. Gięcie promieni mniejszych niż 20 cm wymaga uprzedniego przygotowania. Jest to możliwe na budowie z wykorzystaniem przenośnych giętarek ręcznych lub hydraulicznych. Samo gięcie jest stosunkowo proste, ale niezbędne jest uprzednie dopasowanie do wzmacnianej konstrukcji. Jest to trudne w sytuacjach, gdy konieczne jest wielokrotne owinięcie konstrukcji, jak np. uzwojenie słupa – zamiennie można stosować wtedy pojedyncze owinięcie z zakładem na jednej ze ścian, co niestety powoduje nieco zwiększone zużycie materiału.

Ze względu na znacznie gorszą przyczepność, wykorzystanie materiałów typu SRG (z matrycą cementową) w większości przypadków należy uznać za mało efektywne. Wyjątek stanowią słabe podłoża, np. obiektów zabytkowych, lub konstrukcje murowe (fotografia 3). Zwłaszcza



Fot. 3. Przykłady zastosowania kompozytów SRG: a) zbrojenie muru; b) wzmocnienie sklepienia
Fot. R. Krzywoń

w przypadku budowli zabytkowych właściwości splotów SRP wydają się szczególnie konkurencyjne w stosunku do włókien FRP. Dzięki uzwojeniu ich przyczepność w samej matrycy jest znacznie lepsza, daje to możliwość stosowania matryc o gorszych właściwościach mechanicznych, dodatkowo znaczna odległość splotów ułatwia szczelne wypełnienie przestrzeni między nimi, a matryca może jednocześnie pełnić rolę szepną dla elementów mурowych (np. spoina wsporna muru). Stosowanie matryc cementowych jest korzystniejsze dla konstrukcji, zwłaszcza zabytkowych, gdyż w znacznie mniejszym stopniu zaburza naturalne procesy transportu wilgoci. We Włoszech w bardzo starych budowlach zabytkowych są już pierwsze aplikacje z wykorzystaniem matryc cementowo-wapiennych, a nawet wapiennych. Oczywiście efektywność samego wzmocnienia SRG jest w tych sytuacjach około dwukrotnie mniejsza, ale pozwala uniknąć degradującego mur zjawiska wysalania.

Podsumowanie

Pomimo dużego postępu w zakresie obróbki plastycznej stali, pozycja włókien węglowych we wzmacnianiu konstrukcji betonowych wydaje się niezagrażona. Decydujący o łatwości aplikacji wskaźnik gęstości do wytrzymałości wskazuje na kompozyty CFRP. Istnieją jednak cechy zdecydowanie wyróżniające maty stalowe. Najważniejszą z nich jest urozmaicony asortyment, zwłaszcza mat o małym zagęszczeniu splotów. Możliwość stosowania matryc cementowych, jak wskazują doświadczenia włoskie, nawet wapiennych sprawiają, że kompozyty typu SRG są prawie idealnym materiałem do wzmocnień obiektów zabytkowych. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że w projektowaniu wzmocnień za pomocą kompozytów SRP z powodzeniem mogą być stosowane wytyczne i programy komputerowe opracowane głównie dla kompozytów typu CFRP [3]. Należy jednak pamiętać o odpowiedniej modyfikacji modułu sprężystości oraz wspomnianym wcześniej zwiększeniu o 25% efektywnej długości zakotwienia.

Artykuł częściowo finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki oraz projektu badawczego EU IAPP-2009-251373-INSYSM.

Streszczenie

Artykuł przedstawia kompozyty zbrojone stalą wysokiej wytrzymałości na tle najpopularniejszych, stosowanych w budownictwie kompozytów zbrojonych włóknami organicznymi. Zastosowanie ultrawytrzymałych drutów stalowych pozwala na uzyskanie właściwości zbliżonych do kompozytów typu CFRP, jednocześnie

kształt w formie splotu zapewnia odpowiednią przyczepność zbrojenia do matrycy. Zróżnicowanie zagęszczenia splotów umożliwia stosowanie nie tylko matryc organicznych, ale również opartych na zaprawach cementowych.

Słowa kluczowe: kompozyty, wzmacnianie konstrukcji budowlanych, SRP & SRG.

Abstract

Article describes the properties of composites reinforced with high strength steel wires in comparison with the most popular organic fiber composites. Dense composition of low diameter strands made of ultra high strength steel gives the properties similar to CFRP composites, on the other side low density of wires allows for use of cementitious matrices. Twisting of wires assures good bond with the surrounding matrix material.

Literatura

- [1] Matana M., Nanni A., Dharani L., Silva P., Tunis G.: Bond performance of steel reinforced polymer and steel reinforced grout, Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005) 2005 International Institute for FRP in Construction, s. 126 – 134.
- [2] Castori G., Borri A., Ebaugh S., Casadei P.: Strengthening masonry arches with composites, Proceedings of Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), December 13 – 15 2006, Miami, Florida, USA.
- [3] Mitolidis G.J., Salonikios T.N., Kappos A.J.: Test results and strength estimation of R/C beams strengthened against flexural or shear failure by the use of SRP and CFRP, Composites: Part B 43 (2012) s. 1117 – 1129.

konstrukcja czołownic ABUS o ośmiu kołach jezdnych, dzięki bardzo korzystnemu rozkładowi obciążeń, umożliwia zastosowanie suwnicy o większym udźwigu **bez potrzeby wzmocnienia konstrukcji hali**



ABUS Crane Systems Polska Sp. z o.o.
ul. Gaudiego 20
44-109 Gliwice
tel: (+48) 32 334 70 00

ABUS
www.abuscranes.pl