

# PRZEBUDOWY

## konstrukcji stalowych

### Część 2 analiza stali



**dr inż. Jan Gierczak**  
Katedra Konstrukcji Metalowych  
Politechnika Wroclawska

Przydatność stali do modernizacji i przebudowy wymaga indywidualnych analiz pracy konstrukcji z uwzględnieniem danych historii obiektu.

Przed przystąpieniem do wykonania ekspertyz lub opinii technicznej obiektu należy zapoznać się szczegółowo z historią obiektu.

#### Dokumentacja archiwalna lub inwentaryzacja

W pierwszej kolejności należy ustalić datę rozpoczęcia budowy, wszelkie remonty oraz sposób użytkowania budynku przez cały okres. W tym celu może być przydatne Archiwum Budowlane Miasta, w którym to obiekt się znajduje. Dobrym archiwum projektowym, posiadającym duży zbiór projektów archiwalnych, jest Archiwum Budowlane Miasta Wrocławia, które powstało w wyniku połączenia się dwóch historycznych zespołów, tj. Policji Budowlanej z lat 40. XIX w. oraz dawnej deputacji budowlanej magistratu Wrocławia [1]. Cenny zasób z okresu do 1945 r. zachował się w 80% i jest największym w Polsce zbiorem projektów budowlanych. Możemy tam znaleźć projekty obiektów sakralnych i użyteczności publicznej (np. Hala Stulecia, domy towarowe, budynki gazowni i innych obiektów przemysłowych). Wrocławskie archiwum może poszczycić się posiadaniem projektów sporządzonych przez architektów takich jak Max Berg, Hans Poelzig, Adolf Rading, Hans Scharoun, Erich Mendelsohn, Otto R. Salvisberg, Richard Plüddemann czy Karl Lüdecke. Dane wydobyte z archiwum pozwalają zapoznać się nie tylko z rysunkami architektonicznymi obiektu, lecz także z rysunkami wykonawczymi konstrukcji stalowej. Ponadto dla wielu obiektów zachowały się obliczenia statyczne z przyjętymi założeniami obciążeniowymi. Pozwalają one ustalić ideę wykonywania obiektu, schematy obciążeniowe przyjęte podczas projektowania i poszczególne przekroje. Dane te pozwalają rów-

niez precyzyjnie ustalić nośność pierwotną danej konstrukcji. Zachowana dokumentacja pozwala zredukować czas sporządzania ekspertyzy czy też opinii technicznej. Czas poświęcony na odszukanie dokumentacji projektowej obiektu nie tylko ogranicza zakres robót projektowych, lecz przede wszystkim wpływa na jakość wykonania prac eksperckich. Zaniechanie prac poszukiwawczych w lokalnych archiwach ma skutkuje przyjmowaniem wielu założeń intuicyjnie lub wykonaniem odkrywek, które są zbędne w przypadku dysponowania projektami archiwalnymi. Zdarza się, że właściciel lub zarządca obiektu są zaskoczeni, że budynek ma bogatą dokumentację architektoniczno-budowlaną w miejscowym Archiwum.

Brak dokumentacji projektowej budynku skutkować powinien wykonaniem inwentaryzacji architektonicznej oraz konstrukcyjnej. W przypadku braku informacji o tym, kiedy obiekt był wznoszony, potrzebne są badania materiałowe stali, określenie ich podstawowych parametrów wytrzymałościowych i określenie spawalności stali.

#### Cel przebudowy

Ustalenie celu przebudowy jest istotnym czynnikiem przy wykonaniu prac eksperckich. Pozwala zdefiniować obciążenia użytkowe i technologiczne w przebudowywanym obiekcie. Obciążenia te należałoby przyrównać do obciążeń występujących na obiekcie wcześniej. W przypadku istnienia dokumentacji projektowej należy sprawdzić maksymalne obciążenia, jakie były przyjęte na etapie projektowym. Przy właściwym manipulowaniu obciążeniami można ograniczyć prace do minimum. Takim przykładem może być zastosowanie materiałów izolacyjnych na stropie czy też na dachu, których to ciężar własny maleje.

W takim przypadku można pozwolić na zwiększenie obciążeń użytkowych lub technologicznych, tak aby kombinacja obciążeń nie przekraczała wartości przyjętych w konstrukcjach istniejących. Przy planowaniu kombinacji obciążeń mniejszych niż wynika to z dokumentacji można nie wykonywać opracowań eksperckich, a jedynie ograniczyć się do wykonania opinii technicznych stanu technicznego obiektu.

W przypadku konstrukcji obciążonych zmęczeniowo, jak np. belki podsuwnicowe, należałoby określić żywotność takiej konstrukcji i oszacować liczbę cykli obciążenia, jakiego element doznał. Elementy pracujące pod obciążeniem cyklicznym ponad 30 lat powinny być z definicji wymieniane na nowe. Przy dalszej eksploatacji elementu obciążeniem zmęczeniowym należy określić czas pracy danego elementu pod danym obciążeniem. Analiza powinna obejmować także aspekt ekonomiczny pozostawienia lub wymiany elementu. Elementy nienarażone na obciążenia zmęczeniowe mogą pozostać w konstrukcji pod warunkiem wywoływania sił wewnętrznych nie większych, niż pierwotnie przenosił element.

#### Stosowane stale konstrukcyjne

Zagadnieniem istotnym dla konstruktorów jest określenie gatunku stali zastosowanej w konstrukcji obiektu w okresie budowy, a także późniejszych remontów i przebudów. Przydatna jest w tym przypadku znajomość daty rozpoczęcia budowy i dat wszelkich remontów, gdyż pozwala to na wstępną ocenę wytrzymałości obliczeniowej stali na podstawie rozeznania, jakie gatunki stali były w tym czasie stosowane na danym obszarze kraju. Konstrukcje te mogły powstać na obszarach należących do jurysdykcji niemieckiej, austriackiej czy też ro-



syjskiej. Na tej podstawie można przyjąć stal o najgorszych parametrach, jaka była wtedy w produkcji na danym obszarze, i w przypadku wystarczającej nośności elementów – pominąć badania materiałowe stali. Przy wzmacnianiu konstrukcji lub przebudowie powinno się wykonać badania materiałowe oraz określić skład chemiczny stali, w celu racjonalnego i optymalnego wykorzystania elementów konstrukcyjnych.

W obiektach eksploatowanych przez kilkadziesiąt lat mogły nastąpić zmiany właściwości mechanicznych i plastycznych stali [2] w wyniku wpływów długotrwałego użytkowania. Konieczne jest w takim przypadku rozeznanie aktualnych właściwości stali lub zaniechanie wykorzystywania nośności plastycznej ustrojowej i przekrojowej poszczególnych elementów lub układów konstrukcyjnych.

Najstarszym tworzywem konstrukcyjnym stalowym, jakie można spotkać na terenie Polski, w tym głównie okolic Dolnego Śląska, jest stal zgrzewna. Była ona stosowana na terenie Dolnego Śląska aż do roku 1904. Stal zgrzewna zastąpiła powszechnie stosowane żeliwo. Produkowano ją w małych porcjach wsadu, o masie od 200 do 500 kg, w piecach pudlarskich. Do wytworzenia elementów konstrukcyjnych stosowano stal z różnych wytopów, co powodowało w tych elementach występowanie niejednorodnego składu chemicznego i warstwową budowę. Sprzyjało to powstawaniu lokalnych wad materiałowych oraz znacznemu rozrzutowi cech mechanicznych. Skład chemiczny stali zgrzewnej charakteryzuje się zawartością węgla C: 0,018-0,300% oraz znaczną zawartością siarki S: 0,01-0,06% i fosforu P: 0,02-0,46%. Siarka i fosfor powodują podwyższenie cech mechanicznych stali, natomiast zmniejszają jego plastyczność, tzn. mniejsza

jest wydłużalność, brak wyraźnej granicy plastyczności. W stalach zgrzewnych występuje też azot  $N_2$  od 0,007 do 0,014%, który ma wpływ na kruche pękanie stali, starzenie i pęknięcia przy spawaniu. Wytrzymałość na rozciąganie stali zgrzewnej wzdłuż walcowania waha się od 280 do 460 MPa. Umowna granica plastyczności waha się od 145 do 310 MPa, a moduł Young'a wynosi od 170 do 200 GPa. Wydłużalność całkowita przy zniszczeniu wynosi od 7 do 25%.

### Elementy pracujące pod obciążeniem cyklicznym ponad 30 lat powinny być z definicji wymieniane na nowe.

Po 1855 r. następowało stopniowe zastępowanie produkcji stali zgrzewnej produkcją stali zlewnej. Produkcja stali zlewnej zaczęła dynamicznie wzrastać, kiedy Henry Bessemer wybudował pierwszy konwektor do świeżenia surowki niskofosforowej. Od 1880 r. rozpoczynają prace konwektory Thomasa z wykładziną o odczynie zasadowym. Zabieg ten pozwolił produkować stal zlewą z surowek zawierających dużą ilość fosforu. Zastosowane technologie, a także wsady o większej masie gwarantowały wyższą jakość stali zlewnej oraz większą jej jednorodność. Niemniej jednak stale te zawierały azot w ilości od 0,01 do 0,03%. Azot odpowiedzialny jest za kruche pękanie w niskich temperaturach oraz za starzenie i powstawanie pęknięć przy spawaniu. W stalach zlewnych zawartość węgla jest większa niż w stalach zgrzewnych, natomiast zawartość siarki i fosforu jest mniejsza. Wpływa to na lepszą wydłużalność stali. Parametry mechaniczne, tj. granica doraźna na rozciąganie i granica plastycz-

ności stali zlewnej, są zbliżone do stali zgrzewnych, jedynie moduł Young'a wynosi 210 GPa i jest wartością stałą.

Stale zgrzewne i wczesne stale zlewne są stalami, których obecne właściwości mogą odbiegać dość znacznie od właściwości pierwotnych, gdyż nastąpił proces starzenia materiału. Pod wpływem starzenia materiał się umacnia, tzn. zwiększa się jego wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności i twardość, zmniejszają się natomiast jego właściwości plastyczne – wydłużalność, przewężenie i udarność. Wskutek wzmocnienia ziaren prowadzi to niekiedy do całkowitej eliminacji wyraźnej granicy plastyczności na wykresie próbki rozciąganej. Na starzenie się stali bezpośredni wpływ mają azot i węgiel. Szczególnie szybko starzeniu podlegają stale, które zawierają mniej niż 0,10% węgla. Efekt starzenia spowodowany przez azot jest większy niż ten spowodowany przez węgiel. Zjawisko starzenia pod wpływem azotu może być szybsze i intensywniejsze w wyniku dokonywania w materiale zgniotu na zimno.

W pierwszych latach XX wieku rozpoczęto stosowanie na konstrukcje również stali wysokowęglowych (C:0,30-0,35%) o wytrzymałości na rozciąganie 400-550 MPa. Na początku lat dwudziestych XX wieku rozpoczęto stosowanie stali wysokowartościowych, np. St48. Stal St48 miała naprężenia dopuszczalne 180 MPa, czyli około 30% więcej niż powszechnie stosowana stal St37. Od roku 1925, obok stali St48, podjęto w Niemczech produkcję wysokowartościowej stali krzemowej StSi. Zawierała ona 0,08-0,18% węgla oraz 0,8-1,2% krzemu i dopuszczalne wynosiły dla niej 210 MPa. Pierwszym obiektem zbudowanym ze stali StSi była konstrukcja nawy środkowej hali dworcowej





Tabela 1. Stal zgrzewna – wartości naprężeń dopuszczalnych na zginanie (MPa)

Materiał	Przepisy z	
	1887 r. [N1]	1898 r. [1]
Stal zgrzewna $\sigma_{dop}$ [MPa]	75	90

Tabela 2. Charakterystyki mechaniczne dla stali zlewnych

Oznaczenie stali	Nr normy DIN	$R_m$ [MPa]	$R_g$ [MPa]	$\sigma_{dop}$ [MPa]
St 00.12	1612	≤ 500	-	120
Stal handlowa	1050	340-500	240-280	140(160)
St 37.12	1612	370-450	240-280	140(160)
St 48	-	-	-	156-182
StSi	-	-	-	210
St 52	-	520-640	340-360	~ 200

Tabela 3. Parametry mechaniczne stali konstrukcyjnych stosowanych w Polsce w latach 1937-1950 r.

Oznaczenie stali	$R_m$ [MPa]	Min $R_g$ [MPa]	Min. Wydłużenie %			Wartości naprężeń dop. [MPa]			
			Próbka $A_5$ o grub. [mm] (Próbka $A_{10}$ )			Naprężenia Normalne		Naprężenia ścinające	
			5-7	7-8	8-30	I	II	I	II
010 W	340-420	210	22(18)	26(22)	30(25)	140	120	120	96
015 W	370-450	230	21(17)	25(20)	27(22)	-	-	-	-
020 W	420-500	250	18	22	25	-	-	-	-
015.W37	370-450	230	-	-	25(20)	160	140	128	112
6.1.20.W52	520-620	350	21(17)			230	200	184	160
staliwo	min. 520	-	(min. 14)			-	-	-	-

I – przy obliczeniach dokładnych

II – przy obliczeniach metodami mniej dokładnymi (przy założeniu w wyznaczeniu sił wewnętrznych nieprzekraczających więcej niż 15% od wartości wyznaczonych metodami dokładnymi)

w Legnicy. Została ona przekazana do eksploatacji w 1929 r. i jest w bardzo dobrym stanie technicznym po dzień dzisiejszy. Omówione stale, tj. St37, St38 lub StSi, mogą występować w obiektach na terenie północnym i zachodnim naszego kraju. W tabeli 2 podano charakterystyki stali zlewnych produkowanych w Niemczech do 1940 r. Stali St00.12 od 16 czerwca 1937 r. nie stosuje się do elementów i konstrukcji nośnych.

W 1937 r. wprowadzono dla konstrukcji stalowych budowlanych normę PN/B-190. Po II wojnie światowej norma ta została znowelizowana i od 1946 r. pełniła funkcję normy tymczasowej. W tabeli 3 podano charakterystyki stali stosowanych od 1937 r. do 1950 r.

W drugiej połowie XX wieku zaczęto stosować stale z gatunku St3S, St4S czy też 18G2. Stale te charakteryzują się już lepszą udarnością oraz plastycznością. Nie zawierają azotu i jego związków. Są odporniejsze na starzenie niż stale zgrzewne lub zlewne. Zalicza się je do stali spawalnych. Obecnie zostały one zastąpione stalami S235, S275 oraz S355. Stale te są stalami czystymi, gdyż opracowane tech-

nologie produkcji mają możliwość pozbycia się pierwiastków niepożądanych poprzez dodanie niobu lub wolframu.

Obecnie zaczęto stosować stale o podwyższonej wytrzymałości oraz z poprawioną spawalnością, o nazwie handlowej HISTAR i FRI-TENAR. Charakteryzują się one niską zawartością pierwiastków stopowych połączoną z wysoką wytrzymałością, dobrą udarnością oraz dobrą spawalnością. Dostępne są odmiany o granicy plastyczności 355 MPa i 460 MPa. Dzięki zastosowaniu technologii walcowania QST stal ta pozwala (w odróżnieniu od większości typowych gatunków stali) na wykorzystanie pełnej gwarantowanej granicy plastyczności, na całej długości i grubości elementu. Ze względu na niską zawartość równoważnika węgla Ce wstępne podgrzewanie elementu nie jest wymagane w procesie spawania ręcznego i automatycznego. Standardowo powyższe gatunki są dostarczane z zawartością krzemu Si 0,14-0,25%, co umożliwiła zanurzeniowe ocynkowanie elementu. Stale te nie występują w obiektach kubaturowych na terenie kraju wybudowanych przed XXI w.

Stal starzona w warunkach atmosferycznych do budowli energooszczędnych o profilach bez powłoki ochronnej należy do rodziny niskostopowych stali odpornych na korozję atmosferyczną. Stal ma zastosowanie do obiektów energooszczędnych kładących nacisk na długą trwałość użytkowania przy równoczesnych niskich kosztach utrzymania. Tworzenie się na powierzchni ściśle przylegającej ochronnej powłoki tlenkowej (patyna) redukuje dalsze utlenianie. Stal dalej nie może się utleniać pomimo braku ochrony antykorozyjnej. Przy wzmacnianiu tego typu konstrukcji należy pamiętać, aby rozwiązania konstrukcyjne nie powodowały niszczenia się patyny, np. przy węzłach przegubowych nakładkowych, gdy powierzchnie ścierają się wzajemnie. Stale te w naszym kraju są rzadko wykorzystywane.

Reasumując, stale wyprodukowane pod koniec XIX wieku i do połowy XX wieku zależą od pierwotnych właściwości tych stali i od procesu starzenia. Ogólnie należy spodziewać się dużego obniżenia własności plastycznych i dużych różnic tych własności. Niebezpieczny może być brak odporności stali na kruche pęknięcie w niskiej temperaturze. Przydatność stali do modernizacji i przebudowy wymaga indywidualnych analiz pracy konstrukcji z uwzględnieniem danych historii obiektu. Spawanie starych stali powinno być nieakceptowane ze względu na występowanie azotu i ich związków. Przy spawaniu może zachodzić zjawisko gwałtownego wzrostu kruchości w wyniku procesów termicznych. Szczególne niebezpieczne są złącza nitowane, w których to powstają rysy spowodowane kumulowaniem się efektów starzenia. W tym przypadku najbezpieczniej jest wszelkie połączenia zamieniać lub wytwarzać na śruby sprężające klasy 10.9. Przy roznitowaniu elementów konstrukcyjnych należy unikać technologii wymagających zastosowania narzędzi o udarowym działaniu.

Przy wzmacnianiu konstrukcji ze stali starzonej należy pamiętać, aby nowe rozwiązania konstrukcyjne nie powodowały niszczenia się patyny, np. przy węzłach przegubowych nakładkowych.

W obiektach z końca XIX i początku XX wieku mogą występować słupy wykonane z żeliwa. Słupy żeliwne mają wyłącznie przekrój rurowy o minimalnej grubości ścianki 10 mm i maksymalnej do 80 mm. Żeliwo jest kruche, dlatego łączymy je poprzez śruby. Nie wolno stosować połączeń na nity i spawać. Dla słupów ściskanych osiowo oraz ściskanych i zginanych naprężenia dopuszczalne wynoszą 90 MPa, natomiast dla rozciągania przy zginaniu wynoszą 45 MPa (zgodnie

z DIN 1051 z 1937 r.). Podobne wartości podaje norma PN-B-03200 z 1957 r.

Rozdział ten można podsumować konkluzją, że im starszy obiekt, tym wzmacnianie i naprawianie obiektu jest bardziej uzależnione od materiału, z jakiego obiekt powstał. Rozwiązania konstrukcyjne zaproponowane przy przebudowie obiektu powinny uwzględniać możliwości materiału dołączenia poprzez spawanie, rozrzut parametrów mechanicznych, małą uderalność i plastyczność stali. Uwaga ta jest przede wszystkim skierowana do obiektów powstałych przed 1950 r.

### Wzmacnianie poprzez spawanie

Spawalność konstrukcji stalowych związana jest nie tylko z materiałem, lecz także z określonym elementem konstrukcji, systemem konstrukcyjnym. Czynniki te można podzielić na trzy grupy [3]:

a) spawalność technologiczna – czynniki związane z technologią wykonywania i spawania oraz wpływem na właściwości złącza,

b) spawalność metalurgiczna – czynniki związane z zachowaniem się materiału w czasie spawania i wpływem na właściwości materiału,

c) spawalność konstrukcyjna – czynniki dotyczące rozwiązania elementu konstrukcyjnego, sztywności jego fragmentów, grubości materiału i stopnia nagromadzenia spoin. Z punktu widzenia przydatności konstrukcji do przebudowy podstawowe znaczenie ma spawalność metalurgiczna. Spawalność metalurgiczną dla obecnych stali łatwo określić poprzez wyznaczenie równoważnika węgla na podstawie składu chemicznego stali. Stopień spawalności stali określa się w zależności od wartości współczynnika węgla  $C_e$  oraz grubości spawanego elementu. Jednak dla stali pochodzących z końca XIX wieku i początku XX wieku jest to informacja niewystarczająca, gdyż stale zgrzewne i zlewne z tego okresu zawierały azot, który powodował przede wszystkim starzenie się stali. W wyniku procesów termicznych następował gwałtowny spadek stali ze względu na kruche pęknięcie. Obecnie przy produkcji stali azot nie występuje i dlatego w wielu ośrodkach określających pierwiastki azot jest nieuwzględniany. Generalnie (przy badaniu metodą spektrometrii) określane są pierwiastki C, Mn, Si, P, S, Mg, Ni, Cu, Cr oraz Al. Pomimo że stal zgrzewna i zlewna z początku XX wieku wykazują spawalność, to jednak proces spawania może wywołać niekorzystne zmiany w materiale, zwłaszcza w strefie wpływu ciepła spawania. Przy obciążeniach dynamicznych jest to szczególnie niebezpieczne.

Wykluczone jest spawanie konstrukcji stalowych, gdy elementy są obciążone i przenoszą siły wewnętrzne wywołane obciążeniem zewnętrznym. W takim przypadku przed spawaniem należy konstrukcję odciążać. Jeśli odciążenie konstrukcji nie nastąpi w całości, należy wykonać obliczenia statyczne w dwóch fazach,

Spawanie starych stali powinno być nieakceptowane ze względu na występowanie azotu i jego związków.

tj. przed i po spawaniu, dodając odpowiednie stany do siebie, i tylko dla obciążeń dodatkowych rozpatrywać wzmocnioną konstrukcję.

Spawanie konstrukcji już istniejącej powoduje powstawanie w niekontrolowany sposób naprężeń spawalniczych. Wprowadzane ciepło nieodwracalnie deformuje geometrię układu konstrukcyjnego. Sposób wzmacniania konstrukcji powinien to przewidywać i w miarę możliwości ograniczać wspomniany proces.

Wzmacnianie układów kratowych poprzez dospawanie dodatkowych prętów do istniejących powinno zachować symetrię pręta oraz symetrię układu konstrukcyjnego kraty w płaszczyźnie.

Wzmacnianie konstrukcji stalowych poprzez spawanie dodatkowych prętów jest problematyczne i powinno być wykorzystywane w przypadku braku innych możliwości technicznych. Lepszym sposobem jest wykonanie połączeń punktowych. ■

W kolejnej części cyklu: o pracach przygotowawczych, badaniach, diagnostyce i analizie opłacalności przebudowy.

*Abstract.*

**Reconstructions of steel structures.** *The problem of reconstruction of existing steel buildings will be presented in an article series, which will describe aspects and issues that are important from the point of view of a correctly and rationally led building reconstruction, according to the currently binding law and to the author's personal experience.*

Bibliografia niniejszej części cyklu

- [1] Kirschke K., Kirschke P., Sto lat domu handlowego „Feniks”. „Społem” Powszechna Spółdzielnia Spożywców FENIKS. Wrocław 2004.
- [2] Ziółko J., Ocena stali w diagnostyce konstrukcji stalowych, IV Konferencja Naukowo – Techniczna „Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego”. Kielce 1998.
- [3] Gosowski B., Kubica E., Rykałuk K., Metalowe konstrukcje budowlane. Ćwiczenia laboratoryjne. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980.

### O autorze

Dr inż. Jan Gierczak jest czynnym projektantem, rzeczoznawcą budowlanym, konsultantem wielu firm budowlanych o specjalności konstrukcji stalowych. Brał udział w realizacji licznych obiektów przemysłowych. Jest autorem wielu ekspertyz dotyczących projektowania i wykonawstwa konstrukcji stalowych, a także licznych projektów konstrukcji szklanych z elementami stalowymi (jak np. stalowe kraty linowe), wykonanych ze szkła hartowanego i klejonego. Jest adiunktem w Zakładzie Konstrukcji Metalowych na Politechnice Wrocławskiej.

NOWOŚĆ!

## VIRTUAL STEEL

WYRÓŻNIENIE na XXXI WPPK | Szczyrk 2016

PROGRAM DO TWORZENIA DOKUMENTACJI RYSUNKOWEJ DLA KONSTRUKCJI STALOWYCH

Spolszczony interfejs

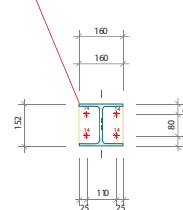
Brak subskrypcji

Własne środowisko CAD

Już od 8 500 zł netto

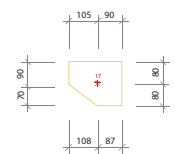
414 BI 20x152x160

$a_{\text{Środ}} = 6$ ,  $a_{\text{Półka}} = 6$   
4 M12 4.6



407 BI 10x195x160

$a = 4$   
1 M16x5 4.6



GammaCAD — dystrybutor w Polsce

A: Romana Maya 1/102, 61-371 Poznań  
T: 61 307 16 33  
E: biuro@gammacad.pl

www.virtualsteel.pl