

Historický vývoj tenkostěnných ocelových konstrukcí



Ing. Jaroslav Vácha

Absolvent Stavební fakulty ČVUT Praha, obor konstrukce a dopravní stavby (1984). Specialista na navrhování atypických nosných ocelových konstrukcí, tenkostěnných konstrukcí, požární odolnost a řešení havarijních stavů ocelových konstrukcí. Autorizovaný inženýr pro statiku a dynamiku staveb.

E-mail: vacha.j@volny.cz,
vacha@excon.cz

Při zmínce o tenkostěnných konstrukcích si většinou vybavíme moderní konstrukce, jejichž vývoj a použití je otázkou posledních desetiletí. Ve skutečnosti však jsou tenkostěnné plošné prvky používány již téměř dvě století a tenkostěnné tyčové prvky déle než století jedno.

Dle definice současné evropské normy jsou do kategorie tenkostěnných ocelových konstrukcí zařazeny prvky a plošné profily vytvarované za studena a materiálem pro toto tvarování jsou povlečené nebo holé za tepla nebo za studena válcované nebo vytlisované plechy či pásy s tloušťkou menší než 3 mm. V dřívějších předpisech se pohybovala hraniční tloušťka pro tenkostěnné konstrukce v rozmezí mezi 4 až 6 mm. Pro tenkostěnné konstrukce je však důležitějším rozlišovacím kritériem tvarování za studena, které specifickým způsobem mění materiálové charakteristiky.

Vývoj metalurgie

Tenkostěnné plošné i tyčové prvky jsou vyráběny z kovových materiálů, především z oceli. Pro rozvoj železných a poté ocelových konstrukcí je důležitý způsob výroby základního materiálu pro tyto konstrukce. Většina kovových materiálů se získává z rud jejich chemickou a tepelnou úpravou. Železo se v přírodním stavu vyskytuje pouze jako tzv. meteorické železo kosmického původu, což byla také první forma železa, kterou lidstvo využívalo. Nejstarší železné předměty, které se vyráběly již tavením rud, pocházejí z období 2000–3000 let př. n. l. Metalurgie jiných kovů je ještě starší. Vyrobené železo bylo houbavité, znečištěné srůstkou a dále se zušlechťovalo kováním. Od 12. až 13. století se kromě železa začala používat i litina, dříve považovaná za odpad při výrobě kujného železa. Původní pece křbového tvaru vyhřívané dřevěným uhlím se koncem středověku zvětšovaly na šachtové pece a vodní pohon dmýchadel umožnil zvýšit teplotu.

Významný posun ve zpracování železných rud nastal na konci 18. století, kdy bylo dřevěné uhlí nahrazeno koksem, který je považován

za jeden z hlavních faktorů průmyslové revoluce. Výroba železa probíhala již ve vysokých pecích.

Produktem výroby ve vysoké peci je surové železo s vysokým obsahem uhlíku, které poté slouží jednak k výrobě litiny a jednak k výrobě oceli. Litina má vyšší obsah uhlíku, je tvrdá, křehká a má v tahu výrazně nižší únosnost než v tlaku. V oboru tenkostěnných konstrukcí se nepoužívá. Pro výrobu oceli je důležitý rok 1784, kdy Henry Cort užil tzv. pudlovací pece k výrobě svářkové oceli. Svářková ocel se poté k výrobě ocelových konstrukcí užívala až do konce 19. století. Dalším důležitým mezníkem ve výrobě oceli je rok 1855, kdy Henry Bessemer upravil výrobní postup zavedením konvertoru. Výsledkem této inovace je plávková ocel, která má oproti svářkové oceli stejné vlastnosti ve všech směrech. S plávkovou ocelí se ve stavebních konstrukcích setkáváme od konce 19. století. Další inovace výrobního postupu již z hlediska základních vlastností oceli nebyly tak významné a byly vedeny snahou o zvýšení ekonomičnosti výroby.

Využití kovů ve stavebnictví před obdobím průmyslové revoluce

Po dlouhé období užití kovů ve stavebnictví až do začátku průmyslové revoluce nebyly výrobky z nich využívány jako nosné konstrukce. Používaly se pouze jako doplňující prvky staveb. Příkladem může být spojování kamenných kvádrů železnými skobami zalitými olovem do vysekaných otvorů, kleštiny stahující klenby, různé kování dveří, mříže do oken a vrat apod. Samostatnou skupinu tvoří kovové krytiny většinou z mědi, případně také z olova nebo železa. Kovové desky však ještě nebyly válcovány, ale tepány. Jednalo se vždy pouze o krytinu bez samostatné nosné funkce. Kovové desky se musely aplikovat na plošnou nosnou konstrukci střechy, jež byla většinou ze dřeva. Příkladem takové střechy je Letohrádek královny Anny na Pražském hradě z poloviny 16. století, na jejíž měděné krytině jsou vidět staré plechové desky nestejného formátu.

První nosné konstrukce z kovu

První nosné konstrukce celé z kovu se objevují koncem 18. století a použitým materiálem byla litina. První konstrukcí se stal most přes řeku Severn v Coalbrookdale v Anglii z roku 1779. První pozemní konstrukcí z litiny a železa byl skelet přádelny v Ditherington u Shrewsbury v Anglii z roku 1796. Obě konstrukce jsou nyní technickými památkami (obr. 1, 2).



▲ Obr. 1. Most přes řeku Severn v Anglii z roku 1779



▲ Obr. 2. Skelet přádelny v Anglii z roku 1796

První aplikace tenkostěnných konstrukcí v 19. století

Prvním tenkostěnným prvkem užitým jako nosná část stavební konstrukce byl vlnitý plech. První zmínka o vlnitém plechu se datuje do 5. století př. n. l., kdy byl vytěpán z bronzu do formy. Skutečné použití vlnitých plechů však souvisí s rozvojem používání kovů na začátku 18. století. Za autora železných vlnitých plechů je považován Henry Robinson Palmer, který obdržel patent v roce 1829 a vlnité plechy použil pro zastřešení skladu v londýnských docích. Palmer byl současně jedním ze tří zakladatelů Institution of Civil Engineers (ICE) v roce 1818. Návrh vlnitého plechu souvisel s požadavkem na lehkou plechovou samonosnou krytinu, protože hladký tenký plech nemá dostatečnou tuhost a systém výztuh je výrobně náročnější než vhodně tvarovaný plech. Palmer však svůj patent záhy prodal do podnikatelského prostředí. Podmínkou výroby tenkých plechů byl rozvoj technologie válcování. První parní válcovna byla v Anglii postavena v roce 1783. První vlnité plechy se nevyráběly z oceli, ale z kujného železa, které má z hlediska protikoročních vlastností vyšší odolnost než ocel. Přesto je

většina staveb byla ze dřeva, v některých případech se však i ze železa nebo oceli. Vnější střešní i stěnový plášť byl z vlnitých plechů, vnitřní plášť většinou z palubek. Vlnité plechy se připojovaly hřebíky nebo hákovými šrouby. Na obr. 5–8 je několik ukázek takových budov, z nichž mnohé slouží až do současnosti původnímu účelu.



▲ Obr. 5. Kostel v Cuxtonu (Anglie) z roku 1897



▲ Obr. 6. Interiér kostela v Cuxtonu



▲ Obr. 7. Kostel v Kilburnu (Anglie) z roku 1862 zvenku



▲ Obr. 8. Detail kostela v Kilburnu

▲ Obr. 3. Historický ruční lis na vlnité plechy

▲ Obr. 4. Moderní válcovací linka

pro další rozvoj využití tenkostěnných prvků rozhodující vynález procesu pozinkování železných a ocelových plechů, který patentoval v roce 1837 Stanislaus Sorel. První stavby se střešním a stěnovým pláštěm z vlnitých plechů vznikají již ve třicátých a čtyřicátých letech 19. století.

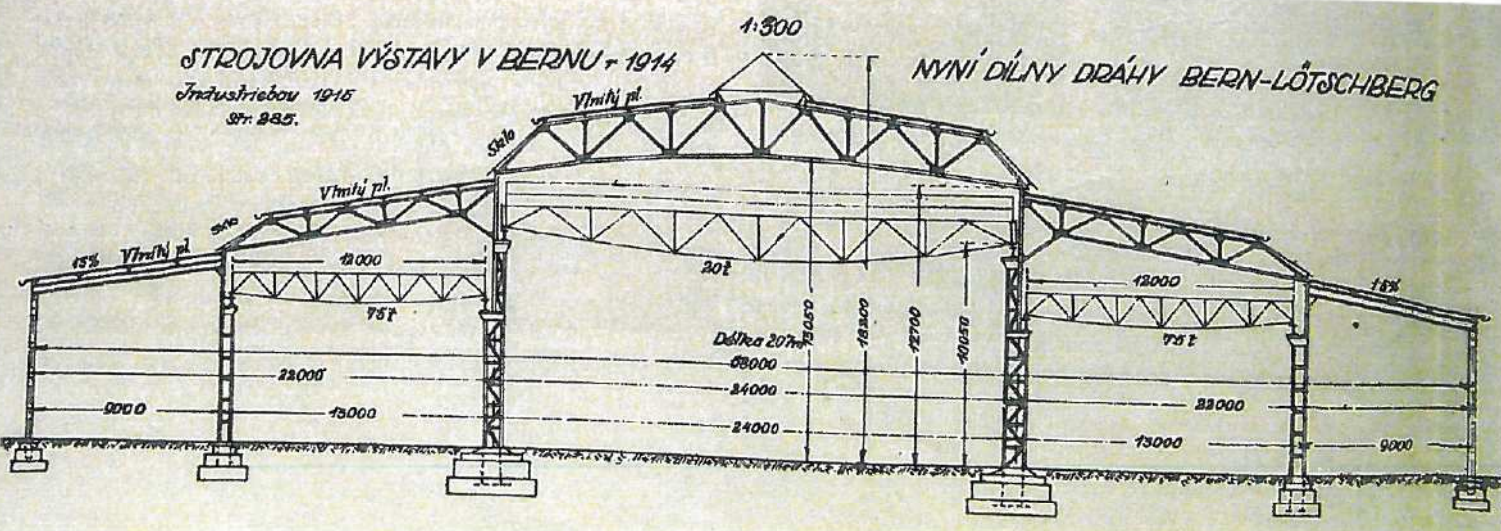
Je zajímavé, že doba prvního použití vlnitých plechů odpovídá i době objevu minerální vlny, která byla poprvé vyrobena v roce 1840 Edwardem Parrym. K vzájemnému širšímu užití obou materiálů, tj. spojení tepelné izolace a tenkostěnné konstrukce, dochází až o sto let později.

Velký rozvoj v použití vlnitých plechů je spjat se zlatými horečkami v USA a Austrálii, které vypukly na začátku padesátých let 19. století. Vyráběly se typové budovy s důrazem na levnou dopravu a realizaci, s pláštěm z pozinkovaných vlnitých plechů. Nejzajímavější z nich byly modlitebny a kostely. Vyráběly se hromadně, jak o tom svědčí reklamní plakáty výrobců, ve kterých inzerují minimální jednotkové ceny na jedno místo, jež se pohybovaly na hranici několika liber. Další skupinou podobných budov byly obytné domy různých velikostí. Nosná konstrukce

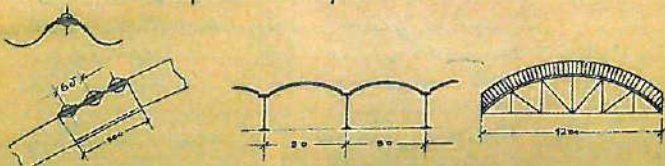
Vývoj tenkostěnných konstrukcí v první polovině 20. století

Po celý zbytek 19. a počátek 20. století je vlnitý plech rozhodujícím plošným prvkem v oboru tenkostěnných ocelových konstrukcí. Aplikace tyčových tenkostěnných prvků jako nosné části stavebních konstrukcí nebyla ještě v tomto období podrobněji rozpracována. Uplatnění vlnitých plechů souvisí s rozvojem užívání nejprve svářkové a postupně plávkové oceli na nosné konstrukce především průmyslových budov a budov dopravní infrastruktury, u kterých se lehká krytina na rozpětí až 3 m těšila velké oblibě. Používala se nejenom jako rovný prvek, oblíbené bylo i zakružování vlnitých plechů podle tvaru střechy a postupně se začaly používat také jako samonosné oblouky.

▼ Obr. 9. Příčná vazba strojovny v Bernu z roku 1914 se střechou z vlnitých plechů



Tabule vlnitých plechů mají šířku 50-70 cm, délku 3-4 m / výjimečně i 6 m. Hledíme k tomu, aby ve vlněch nebyla opora. Podélné styky se mítní křídce / mítní $\phi 6$ mm / a podélnou ve vzdálenostech 250-300 mm. Napříce musí být např. stavěny chybělně, neboť tu přisolí N. H. / Mítní vždy ve vlněch vln. Vzdálenost mítní zde bývá asi 60 a počet 3-5, přesahovní asi 50 cm.



Střešní křídce - ový nemá vlnu. Vlnitý plech je bombován mezi vlnami / viz tabulka 11.

▲ Obr. 10 a 11. Ukázky z přednášky prof. Kloknera z roku 1921 k obloukům z vlnitých plechů

V tomto období se pro navrhování nosných konstrukcí začaly v praxi uplatňovat výpočetní postupy podložené teoretickými pracemi v oblasti stavební mechaniky pro ověření statické únosnosti, a to především pro „silnostěnné“ konstrukce. Pro navrhování prvků opláštění sloužily tabulky únosnosti vydávané jednotlivými dodavateli, což je praxe u plošných tenkostěnných profilů používaná až do současnosti. Únosnosti byly stanoveny na základě praktických zkušeností, nikoliv na základě teoretických studií. Na obr. 9-11 jsou příklady z projektové praxe užití vlnitých profilů z počátku 20. století.

Během první světové války bylo používání rovných i obloukových vlnitých plechů velmi rozšířeno pro rychle montovatelné budovy včetně dočasných úkrytů. Po skončení války se do vedoucího postavení v oboru dostávají Spojené státy americké, kde se postupně začínají uplatňovat i tenkostěnné tyčové prvky. Významnou dochovanou památkou na tyto začátky je budova Virginia Baptist Hospital z roku 1925 v Lynchburgu ve Virginii. V budově s klasickými zděnými svislými konstrukcemi byly jako nosné prvky podlahy užity dvojice tenkostěnných průřezů ve tvaru U zády k sobě. Při rekonstrukci po osmdesáti letech provozu byly shledány nadále plně funkční a byly v konstrukci jako nosné prvky ponechány. Ve třicátých letech se začínají tenkostěnné tyčové prvky využívat jako nosné prvky obytných budov. Stěnový plášť tvořily sádkartonové desky, dřevěné desky nebo ocelové tenkostěnné plošné prvky. Ambiciózní plán využití tohoto konstrukčního systému byl představen v roce 1933 na světové výstavě v Chicagu především jako způsob hromadné výroby rodinných domů budoucnosti. I přes velký zájem veřejnosti systém příliš komerčně úspěšný nebyl a do konce třicátých let bylo realizováno jen několik tisíc budov. Na obr. 12 a 13 je rodinný dům s ocelovou kostrou, který byl

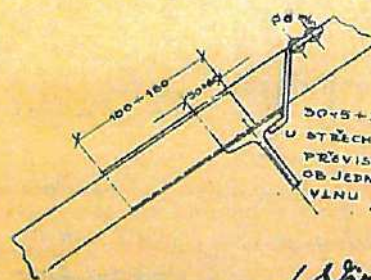


▲ Obr. 12 a 13. Rodinný dům s ocelovou kostrou během výstavby roku 1933 a v současnosti

původně opláštěn deskami podobnými sádkartonu. Další velkou novinkou výstavby z roku 1933 se stal první kovový střešní panel od firmy Armco Steel Corporation. Pro připojování stěnových prvků do tenkostěnných průřezů se začínají používat kalené hřeby, které jsou schopny proniknout tenkou ocelovou stěnou. Do stejného období spadají také počátky širšího využití tepelných izolací na bázi minerální vlny.

$$W = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{16} + 35 \cdot 4 + \frac{1}{16} \right)$$

$$W = \frac{3}{4} = \frac{23}{32}$$



Hodnoty σ , obdržíme, ude slušné jedné a pro vlny plochy můj vzorec Winkla $W = 10.25$

/ viz tabulky statické

Střešní pamoupsné / t.j. bez pro. Plech je tu kanytimon i kanytimonaci a neboli bombován dle kanytimonového ob $\frac{1}{6} L$. Po obarazích / při obarazích / je v mltay I nebo I, p něj se opírá poma i kanytimon i kanytimonaci.

Rozmach užití tenkostěnných konstrukcí po druhé světové válce

Tenkostěnné konstrukce se od „silnostěnných“ liší především lokálním boulením, které významně snižuje únosnosti prvků namáhaných tlakem a ohybem i smykem. Jedná se však o teoreticky náročnou problematiku a její výzkumy začínají až koncem třicátých let. Od roku 1939 se tenkostěnnými konstrukcemi zabýval tým vedený profesorem Georgem Wintrem na Cornellské univerzitě. Vědecké poznatky získané šestiletým výzkumem vyústily ve vydání prvního předpisu AISI pro tenkostěnné za studena tvarované konstrukce v roce 1946. Tento předpis se již zabýval kritérii návrhu s vlivem lokálního boulení, které bylo vyjádřeno zmenšením průřezových charakteristik vlivem efektivních šířek boulelých částí stěn. Přepis se dále zabýval konstrukčními zásadami a řešením detailů připojení. I když se první vydání předpisu zaměřilo v omezeném rozsahu pouze na nejběžnější aplikace, i tak znamenalo průlom v získání jednotných odborných informací potřebných k rozšíření tenkostěnných konstrukcí do praxe. Tento první předpis na světě převzaly i jiné státy. Některé především mimoevropské země převzaly normu bez úprav, evropské státy naopak s úpravami na základě vlastních výzkumů probíhajících koncem čtyřicátých a počátkem padesátých let. V Evropě hrály vedoucí roli Francie, Velká Británie a později Německo. Nástup využití tenkostěnných profilů byl vyvolán poválečnou konjunkturou v USA a rozvojem stavebnictví v souvislosti s nutností poválečné obnovy v Evropě.

Od padesátých let v USA a od šedesátých let v Evropě se hromadně vyrábějí trapézové plechy, které nahrazují starší vlnité plechy. Jsou vyráběny válcováním z nekonečného pásu pozinkovaného plechu. Sortiment trapézových plechů se u jednotlivých výrobců rozšiřuje směrem k vyšším vlnám a k použití vyztužení ve stojnách a širokých pásech ke zmenšení negativního vlivu boulení. Kromě hromadné výroby válcovaných prvků se vyrábí široký sortiment ohýbaných nebo lisovaných prvků. Tento způsob výroby je vhodný pro menší série především tyčových prvků s vysokou variabilitou tvaru. Typickým příkladem užití tenkostěnných konstrukcí s tyčovými i plošnými prvky jsou ocelové domy, které se např. ve Francii začaly stavět již od roku 1945. Nosná konstrukce je z tyčových tenkostěnných prvků, plášť z plošných prvků. Na spojování jednotlivých prvků se používalo svařování, různé systémy zaklapnutí speciálně tvarovaných prvků do sebe, šroubování metrickými šrouby a také šroubování samořeznými šrouby, které se předvrtávají. Typický ocelový dům systému Domofer je na obr. 14 a 15. S podobným systémem plechových domů experimentoval v tuzemsku profesor Janů.

Vývoj ve světě dále pokračoval zavedením pozinkovaných pásů s povrchovou úpravou, která snese tváření za studena na válcovací lince.



▲ Obr. 14 a 15. Ocelový obytný dům systému Domofer a sídliště typových domů

Druhou významnou inovací je první užití samovrtných šroubů v polovině šedesátých let, které významně zjednodušuje a zrychluje spojování tenkostěnných prvků spojením dvou operací – tj. vrtání a šroubování, do operace jediné. Postupně se vyrábějí trapézové plechy o výšce vlny až 200 mm, které umožňují použít trapézové plechy až na rozpětí kolem 8 m, což vede k použití bezvaznicových soustav. Z plošných prvků je významné zahájení výroby stěnových kazet, které stejně jako velkorozponové trapézové plechy umožňují provádět stěnový plášť bez použití paždíků na vzdálenost sloupů ve standardních modulech. Kromě plošných prvků jsou hromadně vyráběny válcované tenkostěnné profily tvaru Z, C nebo U, které se používají jako vaznice a paždíky. Technologie hromadné výroby a optimalizovaný statický návrh využívající spolupůsobení tenkostěnných Z, C nebo U profilů s tenkostěnným pláštěm umožnily zlevnit tyto systémy proti analogickým „silnostěnným“ profilům až o 40 %.

Samostatnou skupinu tenkostěnných konstrukcí tvoří sendvičové panely vyrobené jako kompaktní celek dvou tvarovaných plechů s napevno připojenou tepelnou izolací mezi nimi. Tepelná izolace může být z minerálních vláken, z polyuretanu nebo polystyrenu. Hromadně se tyto prvky vyrábějí od poloviny sedmdesátých let.

Tenkostěnné konstrukce v poválečném Československu

Výroba a využití tenkostěnných prvků po druhé světové válce byly v tuzemsku proti světu a Evropě opožděny především z důvodu nedostatku oceli, jejíž použití ve stavebnictví bylo limitováno. Proto se i na střešní pláště průmyslových budov používaly těžké desky na bázi hutných nebo lehčených betonů a podobných materiálů, v lepším případě pak vlnitých plechů s nabetonováním. Vlastní hmotnost těchto plášťů činila 100 až 150 kg/m² a navíc se projevoval negativní vliv mokřých procesů na stavbě. Vyvinutí lehčího pláště bylo sice dlouhou dobu požadováno, skutečně však byl vyvinut až v roce 1964 jako střešní plechový panel vysoký 70 mm z plechu tl. 1 mm, který se k nosné konstrukci připojoval přivařením a tvarově připomínal jednu vlnu trapézového plechu. Významným mezníkem bylo zahájení výroby trapézových plechů ve Východoslovenských železárnách na počátku sedmdesátých let. Plechy VSŽ se standardně válcovaly z pozinkovaných pásů z oceli řady 37 a výška vlny byla od 30 do 100 mm. Tento sortiment pokryl potřeby stěnových a střešních trapézových plechů do cca 3–4 m rozpětí. Z tenkostěnných ohýbaných tyčových prvků bylo sestaveno několik typů hromadně vyráběných hal. Pozinkované válcované tyčové prvky ani velkoplošné sendvičové panely se v tuzemsku až do konce osmdesátých let nevyráběly.

Zatímco v oblasti výroby a použití tenkostěnných plošných a tyčových prvků jsme za vyspělými zeměmi zaostávali, na poli teoretickém byla situace příznivější. Na vypracování normy pro navrhování tenkostěnných ocelových konstrukcí se pracovalo už v šedesátých letech a výsledkem byl moderní předpis, který jako jeden z prvních uplatnil v teorii tenkostěnných konstrukcí navrhování podle metodiky mezních stavů. Za všechny specialisty pro tento obor je nutné uvést alespoň dvě jména odborníků, kteří se o rozvoj teorie tenkostěnných konstrukcí v tuzemsku nejvíce zasloužili, a to profesor Škaloud a profesor Studnička. Konec osmdesátých let pak znamenal



▲ Obr. 16. Balík plechů VSŽ



▲ Obr. 17. Opláštění elektrárny Pruněřov II

nejen významný zlom v politické rovině, ale po technické stránce otevřel možnost využívat nejmodernější poznatky a produkty i v oboru tenkostěnných konstrukcí. Na obr. 16 je vidět balík plechů VSŽ a ukázka opláštění z počátku osmdesátých let. Pojem plechy VSŽ v ČR až do současnosti představuje synonymum pro tenkostěnné plošné prvky. ■

Použitá literatura:

- [1] Klokner, F.: Železné stavby pozemní – tabulky a Železné stavby pozemní podle přednášek Ing. Františka Kloknera, nákladem posluchačů inženýrství a ústřední komise pro vydávání přednášek na Vysokém učení technickém v Praze, 1922.
- [2] Válcovní programy, Prodejna sdružení československých železáren a.s., Praha, 1927.
- [3] Faltus, F.: Ocelové konstrukce pozemního stavitelství, Státní nakladatelství učebnic, Praha, 1951.
- [4] Škaloud, M.: Francouzské tenkostěnné ocelové konstrukce z profilů tvarovaných za studena, Inženýrské stavby 7/1960.
- [5] Škaloud, M.: Tenkostěnné ocelové konstrukce z profilů tvarovaných za studena, SNTL Praha, 1963.
- [6] Studnička, J.: Ocelové konstrukce I, Vydavatelství ČVUT v Praze, 1996.
- [7] Allen, D.: History of cold formed steel, Structure magazine 11/2006.

english synopsis

Historical Development of Thin-Walled Steel Structures

Thin-walled area elements have been used for nearly two centuries now and thin-walled bar elements for more than a century. The article focuses on the development of thin-walled steel structures from the start of iron metallurgy up to their utilization after the World War II.

klíčová slova:

tenkostěnné ocelové konstrukce, metalurgie železa

keywords:

thin-walled steel structures, iron metallurgy

odborné posouzení článku:

Ing. Michael Trnka, CSc.,

autorizovaný inženýr v oborech statika a dynamika stavebních konstrukcí a mosty a inženýrské konstrukce