České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering

Dr. Ing. Jakub Dolejš

Vysokopevnostní oceli pro stavební konstrukce

High strength steels for engineering structures

Summary
Research and development in the field of structural steel is generally oriented towards a major increase of the material strength nowadays. High strength steel applications were initially in mechanical engineering and found their way to civil engineering as well over time. Cost difference between high strength steels and traditional mild steels has significantly decreased in recent years. While standard procedures allow for using of high strength steels in civil structures in principle, certain reluctance can still be seen in the civil engineering industry in general. This could be explained by the tendency towards using traditional solutions and the fact that Czech steel producers focus on the basic S 235 and S 355 mild steel grades in a substantial amount. This attitude is very often unsuitable from the viewpoint of civil structure efficiency and the need for reduced environmental impact of structures and structural materials production.

Souhrn
Vývoj v oblasti výroby konstrukčních ocelí směřuje v posledních letech všeobecně k významnému zvyšování jejich pevnosti. Nejdříve se vysokopevnostní oceli uplatňovaly ve strojírenství, později se začaly používat i pro stavební konstrukce. Cenový rozdíl oproti ocelím standardních pevností se v poslední době výrazně snížil. Ačkoliv normové postupy používání těchto materiálů v zásadě umožňují, z přístupu praxe lze zatím stále vyčíst jistou zdrženlivost. Vysvětlením může být jednak náklonnost k tradičním přístupům, jednak fakt, že produkce domácích hutních společností se zaměřuje v podstatné míře na základní materiály pevnostních tříd S 235 a S 355. Z pohledu efektivity návrhu stavební konstrukce i s ohledem na požadavky na snížení ekologické náročnosti výroby konstrukčních materiálů a konstrukcí je tento přístup dnes již často nevhodný.

Klíčová slova:

vysokopevnostní ocel, ČSN EN 1993-1-12, ocelová konstrukce, stavebnictví, statický návrh, materiálové vlastnosti, svary, mosty, vysoké budovy

Key words:

high strength steel, EN 1993-1-12, steel structure, civil engineering, static design, material properties, weld, bridges, high buildings

Obsah

1. Obecně 6
1.1 Definice vysokopevnostních ocelí 6
1.2 Dostupný sortiment 8
2. Vlastnosti vysokopevnostních ocelí 8
2.1 Technologie výroby 9
2.2 Chemické složení 10
2.3 Mechanické vlastnosti 10
2.4 Svařitelnost 13
3. Odlišnosti návrhu podle ČSN EN 1993-1-12 [13] 15
4. Příklady použití 18
5. Výzkum vysokopevnostních ocelí na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí stavební fakulty ČVUT v Praze 20
5.1 Spřažené ocelobetonové nosníky (Tunega, Dolejš) 20
5.2 Šroubové spoje (Hatlman, Dolejš) 21
5.3 Svarové spoje (Brtník, Dolejš) 22
6. Závěr 24
Literatura 25
Autor a CV 27

1. Obecně

Vývoj vysokopevnostních ocelí a ocelí vyšší jakosti ve světě započal v 60 letech minulého století. Je ovšem namístě připomenout, že nejvyšší třídy se používají ponejvíce v lodním a automobilovém průmyslu, kdy je kromě vysoké pevnosti využívána další příznivá vlastnost těchto materiálů, a to otěruvzdornost.
V posledních letech se ovšem využití vysokopevnostních ocelí ve stavebnictví výrazně zvyšuje.

1.1 Definice vysokopevnostních ocelí

Ještě na počátku 90. let 20. století se za běžnou ocel považoval materiál s mezí kluzu rovnou 235 MPa (základní označení S 235) a ocel S 355 se uváděla jako vysokopevnostní. V té době se ocel S 355 používala jen na velmi exponované stavební konstrukce (mosty) a ocel S 235 ve všech běžných případech. S nástupem Eurokódů byly obě pevnostní třídy zahrnuty mezi základní oceli (ČSN P ENV 1993-1-1/1994 [2]), tab. 1. a oceli s mezí kluzu vyšší než 355 MPa byly považovány za vysokopevnostní. V následujícím textu označuje f_y mez kluzu a f_u mez pevnosti.

Tab. 1. Definice běžných ocelí, ČSN P ENV 1993-1-1/1992 [2]

Norma a pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 100	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
EN 10025				
Fe 360	235	360	215	340
Fe 430	275	430	255	410
Fe 510	355	510	335	490
prEN 10113				
Fe E 275	275	390	255	370
Fe E 355	355	490	335	470

V roce 1997 byla vydána změna normy A1, která obsahovala přílohu D věnovanou použití ocelí S 420 a S 460.

Tab. 2. Změna A1: ČSN P ENV 1993-1-1 (rok 1997), Příloha D – Použití ocelí třídy S420 a S460 [2]

Pevnostní třída oceli podle EN 10113	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)					
	t ≤ 40		40 < t ≤ 100			
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)		
S 460 N	460	550	430	550		
S 460 M	460	530	430	530		
S 420 N	420	520	390	520		
S 460 M	420	500	390	500		
Pevnostní třída oceli podle EN 10137	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)					
	t ≤ 40		50 < t ≤ 100		100 < t ≤ 150	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
S 460 Q	460	550	440	550	400	500

Konečně vydáním definitivní verze základní ocelářské normy ČSN EN 1993-1-1/2006 [1] byly všechny výše uvedené oceli zařazeny mezi „běžné“ (tab. 3). V té době se pro oceli S 420 a S 460 vžilo označení „oceli vyšší pevnosti“, které se neoficiálně používá dosud.

Tab. 3. Definice běžných ocelí, ČSN EN 1993-1-1/2006 [1]

Norma a pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL	460	570	440	550

Norma a pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Tato situace umožňovala bez omezení používat oceli uvedené v tab. 3 pro účely stavební výroby. Bylo to v době, kdy se ve strojírenství už běžně používaly oceli s výrazně vyšší mezí kluzu než 460 MPa. Po intervenci švédských zástupců v normalizačních komisích byla v následujících letech uvedena v platnost zcela nová norma ČSN EN 1993-1-12/2008 (česká verze), Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-12: Doplňující pravidla pro oceli vysoké pevnosti do třídy S 700 [13], která pro stavební konstrukce umožnila použití ocelí uvedených v tab. 4. Norma ovšem udává řadu omezení, která musí být při statickém návrhu respektována. Tato pravidla budou stručně shrnuta v dalších částech textu.

Tab. 4. Oceli podle ČSN EN 1993-1-12/2008 [13]

Oceli válcované za tepla						
Norma a pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)					
	t ≤ 50		50 < t ≤ 100		100 < t ≤ 150	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
EN 10025-6						
S 500Q/QL/QL1	500	590	480	590	440	540
S 550Q/QL/QL1	550	640	530	640	490	590
S 620Q/QL/QL1	620	700	580	700	560	650
S 690Q/QL/QL1	690	770	650	760	630	710

Ploché výrobky válcované za tepla				
Norma a pevnostní třída oceli	Jmenovitá tloušťka prvku t (mm)			
	1,5 ≤ t ≤ 8		8 < t ≤ 16	
	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
EN 10149-2				
S 500MC	500	550	500	550
S 550MC	550	600	550	600
S 600MC	600	650	600	650
S 650MC	650	700	630	700
S 700MC	700	750	680	750

Oceli s mezí kluzu vyšší než 700 MPa se v literatuře často označují termínem „oceli s velmi vysokou pevností“.

1.2 Dostupný sortiment

Zejména velké, nadnárodní ocelářské společnosti průběžně rozšiřují svůj sortiment v oblasti válcovaných tyčí i plochých výrobků.
Společnost Arcelormittal dodává poměrně širokou škálu válcovaných tyčí v jakosti HISTAR 420, 460 a 500 (obchodní označení s charakteristickou hodnotou meze kluzu). Jde zejména o větší průřezy: IPE 500 až IPE 750, HE 260A až HE 1000A, HE 260B až HE 1000B, HE 260M až HE 1000M, HD 260 až HD 400, dále profily HP, HL až do výšky 1100 mm a další.
Další významná společnost SSAB Oxelösund (součást koncernu Svensk Stål Group) vyrábí systémové řady materiálů s obchodním označením WELDOX, DOMEX a HARDOX v pevnostních třídách 420, 460, 500, 700, 900, 960 a 1100. Německá Dillinger Hütte se zaměřuje především na produkci plechů až do pevnostní třídy 1100. Společnost RUUKKI nabízí široký sortiment plechů z ocelí označovaných OPTIM a RAEX (až do třídy S 1200). Výrobou a distribucí prvků z ocelí vyšších a vysokých pevností se zabývají i další evropské firmy, jako Voest-Alpine, British Steel apod. Válcované tyče všech průřezů mohou být dodávány podle požadavku půdorysně i svisle zakřiveny, plechy mohou být dodány dokonce s proměnnou tloušťkou (např. Dillinger Hütte).
V USA lze zaznamenat snahu vyvinout nové vysokopevnostní oceli pro mostní konstrukce, které by odolávaly atmosférickým vlivům bez nátěru. V současných návrhových normách jsou uvedené oceli třídy 36, 50, 70, 100 ksi (250, 345, 485 a 690 MPa). Korozivní způsobilost je dána označením W, například 50W, 100W. Výroba a použití vysokopevnostních ocelí se ve velké míře rozvíjí také v dalších zemích, například v Japonsku a v Kanadě.

2. Vlastnosti vysokopevnostních ocelí

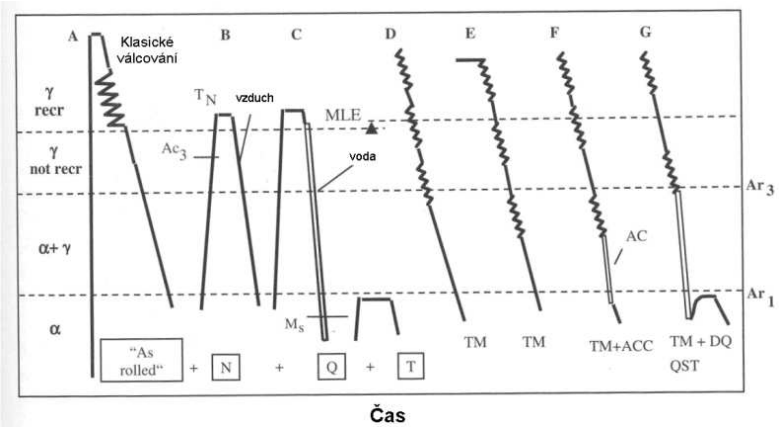
Mezi hlavní obecné výhody použití vysokopevnostních ocelí ve stavebnictví lze zařadit:

Spolehlivost: Vysokopevnostní oceli mají ve srovnání s běžnými ocelemi menší rozptyl vlastností.
Bezpečnost: Moderní oceli vysokých pevnostních tříd nevykazují jen vysoké hodnoty pevnosti, ale kombinují je s dalšími dobrými vlastnostmi.
Životní prostředí: Konstrukce díky subtilnějším prvkům a jejich menším počtu šetří omezené přírodní zdroje.
Ekonomika: Snížení hmotnosti konstrukcí má za následek snadnější montáž, menší objem svarů a ve výsledku vede k nižší ceně za stavební dílo.
Architektura: Díky subtilnějším prvkům je možný návrh elegantních konstrukcí, které lépe zapadají do okolního prostředí.
Jako hlavní nedostatek vysokopevnostních ocelí se všeobecně uvádí **vysoká cena** a **menší dostupnost**. Jak bude naznačeno dále, v mnoha případech vycházejí konstrukce z vysokopevnostních ocelí cenově příznivěji než z běžných materiálů a dostupnost se každým rokem významně zvyšuje.

2.1 Technologie výroby

Existují dva hlavní postupy, jak dosáhnout vyšší meze kluzu: legování a tepelné zpracování, popř. kombinace obou.
Legování
Dříve používaným způsobem bylo legování především uhlíkem a manganem. Nevýhodou tohoto postupu je nepříznivé ovlivnění dalších mechanických a také technologických vlastností vyšším množstvím legur. S vyšším přídavkem legur klesá především vrubová houževnatost, tažnost a svařitelnost oceli.
Tepelné zpracování
Tepelné zpracování mění mikrostrukturu a velikost zrn. Hlavní výhodou tohoto procesu je dosažení jemné mikrostruktury, jehož výsledkem je vyšší pevnost, stejně jako lepší houževnatost v porovnání s materiálem běžné mikrostruktury. V současnosti se vysokopevnostní oceli vyrábí především pomocí **řízeného termomechanického válcování,** případně kalením a následným popouštěním. Pomocí těchto procesů je dosaženo jemnozrnné struktury oceli, díky které je možno dosáhnout vysokých pevností bez nutnosti vyšších přídavků legur a z toho plynoucích omezení co se týče zpracovatelnosti a vyšších výrobních nákladů. Vysokopevnostní jemnozrnné oceli lze podle výrobního postupu rozdělit na oceli normalizačně žíhané (označované N), termomechanicky zpracované (M), kalené (Q) a precipitačně zpevněné (QA). Mikrolegované jemnozrnné oceli vycházejí z výroby normalizačně žíhaných ocelí (označení N).
Zušlechtěné oceli (Q) jsou po řízeném válcování a dválcování zrychleně ochlazeny ve vodním prostředí (sprcha), případně jsou po ochlazení znovu

šlechtěny. Precipitačně zpevněné oceli jsou po řízeném válcování a ochlazení popouštěny na teploty, při kterých se výrazně zpevní.



Obr. 1.: *Příklady válcovacích procesů, na svislé ose je teplota [26]*

Tepelné zpracování s dolegováním

Zvýšení meze kluzu a meze pevnosti nelegovaných konstrukčních ocelí při zachování jejich dobré houževnatosti a současně potlačení vlivu uhlíku na jejich svařitelnost lze dosáhnout jejich dolegováním malými obsahy prvků jako hliník, titan, niob a vanad. Působení těchto prvků spočívá v umožnění vzniku jemnozrnné struktury a navíc svou vazbou na uhlík a dusík formou precipitačního zpevnění zvyšují pevnosti materiálu.

2.2 Chemické složení

Termomechanicky válcované oceli se vyznačují v zásadě stejným chemickým složením jako běžné oceli. U ocelí legovaných a ocelí vyrobených kombinací termomechanického válcování a legování je zastoupení legur logicky vyšší.

Většina vysokopevnostních ocelí má stejný, popř. jen lehce zvýšený obsah uhlíku jako běžné oceli (okolo 0,2 %). Mezi nejběžnější legující prvky patří mangan, chrom, křemík, měď, fosfor, síra, nikl, molybden a další.

2.3 Mechanické vlastnosti

Vysokopevnostní oceli tvoří specifickou skupinu ocelí. Některé mechanické vlastnosti jsou u nich lepší, než u běžných ocelí, jiné zůstávají na stejné úrovni a některé jsou naopak horší.

Pracovní diagram

Vysokopevnostní oceli mají oproti běžným ocelím vyšší mez kluzu a vyšší mez pevnosti. Pracovní diagram se ve srovnání s běžnými ocelemi výrazně odlišuje zejména v těchto bodech:

- Mez kluzu

Mez kluzu je nevyznačená, je označována jako **smluvní** a je definována napětím při dosažení trvalé deformace rovné 0,2 % nebo napětím při dosažení 0,5 % celkové deformace.

- Mez pevnosti

Mez pevnosti je z podstaty vysokopevnostních ocelí vyšší než u běžných ocelí.

- Poměr meze pevnosti a meze kluzu

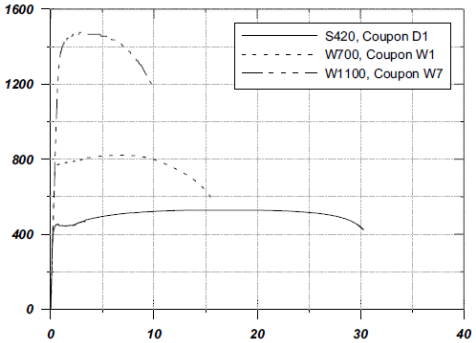
Poměr meze pevnosti a meze kluzu je nižší než u běžných ocelí. U oceli S 235 například dosahuje poměr f_u/f_y hodnot okolo 1,50 (požadavek ČSN EN 1993-1-1 pro běžné oceli je alespoň 1,10), zatímco u ocelí S 700 je tato hodnota okolo 1,07 a u vyšších tříd dokonce ještě nižší.

- Tažnost

Tažnost patří mezi vlastnosti, které použití vysokopevnostních ocelí významně limitují. Všeobecný požadavek na dostatečnou tažnost materiálu má zajistit zamezení vzniku náhlého křehkého lomu. K tomu je potřeba, aby obsah uhlíku (který zvyšuje pevnost, ale snižuje schopnost materiálu plasticky se deformovat) zůstal mezi 0,15 a 0,30 %.
Obecně je tažnost vysokopevnostních ocelí nižší. Přesto vývojem nových technologických postupů, zejména termomechanickým válcováním, bylo dosaženo kvalitních ocelí s vysokou pevností a dostatečnou tažností. Některé vysokopevnostní oceli vyrobené termomechanickým válcováním dosahují tažnosti až 20 % (požadavek ČSN EN 1993-1-1 pro běžné oceli je alespoň 15 %). Na obr. 2 je výsledek tahových zkoušek ocelí s charakteristickou mezí kluzu v rozmezí od 420 do 1100 MPa, tažnost se pohybuje mezi 10 a 30 %.

- Modul pružnosti

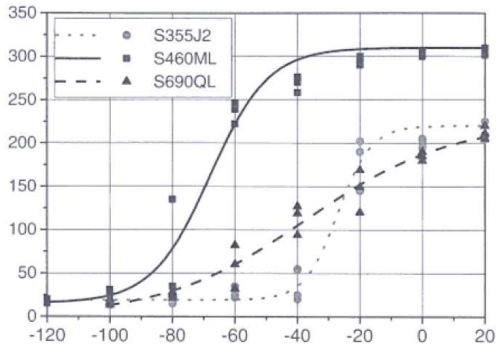
Modul pružnosti je pro všechny konstrukční oceli přibližně stejný, a to 210 000 MPa. Pro některé konstrukční prvky z vysokopevnostních ocelí (například plnostěnné nosníky) se tato skutečnost ve výsledku změní v nevýhodu, protože díky velkým průhybům není možné využít zvýšené pevnosti materiálu.



Obr. 2.: *Příklad pracovních diagramů ocelí WELDOX 1100, WELDOX 700 a DOMEX 420, na vodorovné ose je přetvoření v %, na svislé napětí v MPa [25]*

Vrubová houževnatost

Vrubová houževnatost oceli je charakterizována energií spotřebovanou při Charpyho zkoušce a vždy se vztahuje k teplotě vzorku. Úroveň vrubové houževnatosti vysokopevnostních ocelí kolísá podle konkrétního typu oceli, tedy zejména chemického složení a technologického postupu výroby. Ukazuje se, že moderní způsob výroby využívající termomechanické válcování umožňuje dosahovat výborné vrubové houževnatosti vysokopevnostních ocelí zejména za velmi nízkých teplot (obr. 3.).



Obr. 3.: *Vrubová houževnatost v J v závislosti na teplotě podle [26]*

2.4 Svařitelnost

Svařitelnost oceli je ovlivněna zejména jejím chemickým složením. Vliv chemického složení na svařitelnost lze kvantifikovat tzv. uhlíkovým ekvivalentem C_e, jenž vyjadřuje příspěvek jednotlivých legur ke kalitelnosti oceli. Čím se daná ocel snadněji zakalí, tím je vyšší nebezpečí vzniku křehkých zakalených struktur jako martenzit či spodní bainit v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svaru nebo svarového kovu i při nižších rychlostech ochlazování. Uhlíkový ekvivalent C_e je tedy zároveň ukazatelem zakalitelnosti i svařitelnosti, se vzrůstající hodnotou C_e obecně klesá svařitelnost oceli. Do vzorců pro výpočet C_e se dosazují v hmotnostních procentech obsahy prvků v oceli. V literatuře je dostupných hned několik rovnic vyjadřujících uhlíkový ekvivalent. V současnosti nejpoužívanější je vzorec (1) navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW) platný pro oceli s obsahem uhlíku do 0,25%

$$C_e(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}\ [\%] \qquad (1)$$

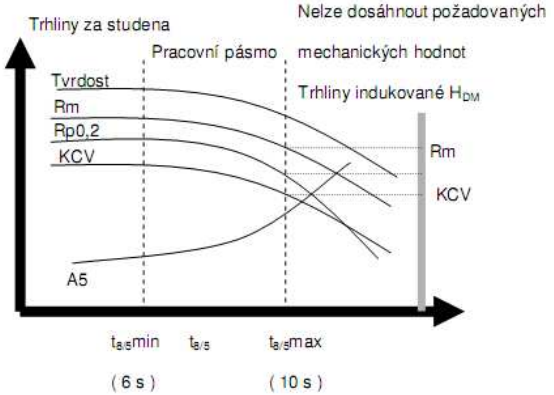
Uhlíkový ekvivalent obecně s rostoucí třídou oceli stoupá, oceli třídy S 420 mají uhlíkový ekvivalent okolo 0,3 %, oceli třídy S 1100 okolo 0,6 %. Z toho vyplývá, že vysokopevnostní oceli mají horší svařitelnost než běžné oceli. Neznamená to ovšem, že je není možné svařovat nebo že svary těchto ocelí jsou slabým místem svařované konstrukce. Je ovšem potřeba dodržet přísnější technologický postup svařování.

Teplota předehřevu, interpass a doba chladnutí $t_{8/5}$

Náchylnost oceli k tvorbě studených trhlin roste se zvyšující se mezí kluzu a kromě chemického složení oceli je závislá také na obsahu difúzního vodíku ve svaru, rozměrech svařovaných dílů a na tuhosti svařenců a množství tepla vneseného do svaru na jednotku jeho délky. Základním technologickým opatřením snižujícím riziko vzniku trhlin za studena ve svarech je **předehřev** spojovaných částí, který snižuje rychlost ochlazování svaru a tím zabraňuje zakalení TOO svarového spoje i svarového kovu a současně umožňuje vznik struktur příznivějších pro difúzi vodíku. Předehřev také prodlužuje dobu, po kterou může vodík ze svaru difundovat. Kromě pozitivního ovlivnění difúze vodíku předehřev také snižuje teplotní gradienty v průběhu svařování, což má kladný vliv na zbytková napětí ve svarech. Teplota předehřevu může být stanovena na základě diagramu anizotermického rozpadu austenitu, tzv. ARA-diagramu, nebo výpočtem podle empirických rovnic získaných statistickým vyhodnocením zkoušek praskavosti svarů.

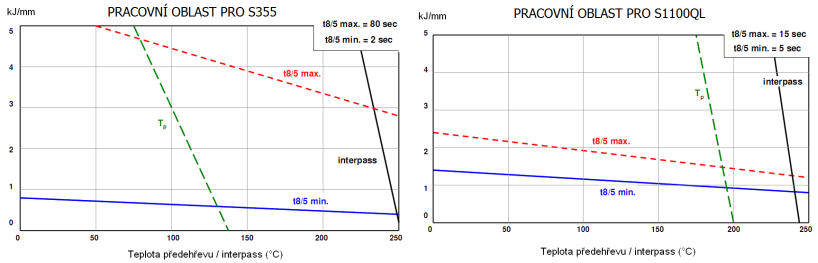
Kromě teploty předehřevu je důležitým technologickým faktorem také mezihousenková teplota (**interpass**) T_i. Teplota interpass se vztahuje

k teplotě vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před uložením následující svarové housenky.
Při návrhu technologie je hlavním cílem najít vhodný kompromis mezi sklonem k tvoření studených trhlin a mechanickými vlastnostmi svaru. K tomu vedle výše uvedených faktorů patří i geometrie svaru a svařovací postup. Tyto procesní faktory jsou reprezentovány jednou charakteristickou veličinou, křivkou průběhu teploty v čase při svařování, tzv. dobou ochlazování $t_{8/5}$. Doba ochlazování $t_{8/5}$ je charakterizována časem, za který klesne teplota svarové housenky a TOO z 800°C na 500°C. Příliš rychlé ochlazování má za následek vysoké hodnoty tvrdosti v TOO. Naproti tomu při příliš pomalém ochlazování hrozí nebezpečí, že nebude v TOO dosaženo dostatečných hodnot pevnosti a houževnatosti. V praxi ověřené hodnoty $t_{8/5}$ se podle zkušeností pohybují podle typu úlohy a požadavků v rozmezí 6 až 20 s. Uvedené hodnoty platí pro válcovaný základní materiál. Obr. 4 znázorňuje příklad závislosti mechanických vlastností na době chladnutí pro ocel S 1100QL1.



Obr. 4.: *Vliv času $t_{8/5}$ svarového kovu na vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti [28]*

S prodlužující se dobou chladnutí $t_{8/5}$ klesají kromě tažnosti všechny ostatní sledované mechanické vlastnosti. Proto je nutné při návrhu svaru vysokopevnostního plechu brát na vědomí i toto hledisko a podle toho zvolit parametry svařování a teploty předehřevu.
Pro známé hodnoty průběhu teplot $t_{8/5}$ lze vytvořit pracovní oblast teplot vyhovujících vstupním podmínkám. Na obr. 5 jsou vykresleny pracovní oblasti pro oceli S 355 a S 1100QL. Z obrázku je zřetelné, jak úzké je pracovní pásmo pro svařování vysokopevnostní oceli.



Obr. 5.: *Pracovní oblasti pro běžnou a vysokopevnostní ocel [28]*

3. Odlišnosti návrhu podle ČSN EN 1993-1-12 [13]

Tento dokument předepisuje úpravy a dodatky jednotlivých ocelářských norem řady ČSN EN 1993 pro použití ocelí tříd S 500 – S 700. Často je pouze konstatováno, zda normu lze použít, či nikoli. V některých případech však dochází k úpravám původního postupu či k doplnění textu. V následujícím odstavci jsou pro jednoduchost uváděny pouze zkrácená označení norem.

ČSN EN 1993-1-1 Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby [1]

Kromě tabulek se základními nominálními charakteristikami ocelí tříd S 500 - S 700 (zde tab. 4) jsou uvedena další pravidla týkající se například požadované hodnoty poměru f_u/f_y, protažení při přetržení vzorku a mezního poměrného protažení ε_u. Doporučené hodnoty jsou: $f_u/f_y > 1{,}05$; protažení při přetržení vzorku ne méně než 10%; $\varepsilon_u > 15f_y / E$. U ocelí v pevnostních třídách uvedených v normě (tab 4.) se může předpokládat, že tyto požadavky jsou splněny. Navazující poznámka se týká filozofie návrhu: deformační schopnost ocelové konstrukce závisí jak na tažnosti, tak na houževnatosti jejích základních prvků. Vzhledem k vyšším hladinám napětí v prvcích z ocelí vyšších tříd je třeba věnovat zvláštní pozornost deformacím i volbě detailů, které nezpůsobí vruby ani jiné koncentrace napětí.
Významný bod se týká globální analýzy prutové konstrukce s uvážením nelinearity materiálu. Norma v zásadě nedovoluje použít plasticitní globální analýzu. Připouští pouze nelineární plasticitní analýzu s uvážením částečné plastifikace prutů v plastifikovaných zónách.
Návrhové únosnosti prutů se až na výjimky stanoví podle stejných pravidel jako v případě ocelí běžných jakostí. Výjimky se týkají těchto bodů:

- návrhová únosnost oslabeného taženého prvku,
- návrhová únosnost oslabeného ohýbaného prvku.

V obou případech jde přitom v podstatě o totéž. U běžných ocelí kmenová norma [1] umožňuje posouzení tažené části oslabeného průřezu s využitím meze pevnosti f_u při použití většího součinitele spolehlivosti γ_{M2}. U ocelí tříd S 500 - S 700 je nutno provést posudek taženého oslabeného prvku podle vztahu:

$$N_{t,Rd} = 0{,}9\, A_{net} \cdot f_y / \gamma_{M12}, \qquad (2)$$

kde $\gamma_{M12} = 1{,}25$ a A_{net} je oslabená plocha průřezu.
Pro ohýbaný prvek je nutno při posouzení stanovit průřezový modul se zohledněním oslabení v tažené části.
Pro přiřazení křivek vzpěrné pevnosti se u ocelí z tab. 4. použijí pravidla pro S 460.

ČSN EN 1993-1-4 Korozivzdorné oceli [5]

Normu nelze pro oceli uvedené v tab. 4 použít vůbec.

ČSN EN 1993-1-6 Skořepiny [7]

Normu lze použít pro oceli podle tab. 4. bez omezení s jednou výjimkou. Nelze použít Přílohu B, která se týká plastické únosnosti skořepin.

ČSN EN 1993-1-8 Styčníky [9]

Norma předepisuje úpravy řady ustanovení. Hlavními dotčenými body jsou tyto:

- Únosnost šroubů v oválných otvorech: Šrouby v oválných otvorech smí být použity pouze pro spoje kategorie C, tedy spoje odolné prokluzu v MSÚ.
- Připojení úhelníků šrouby nebo nýty: U nesymetrických prutů či nesymetricky připojených symetrických prutů je nutno zohlednit excentricitu ve styčnících. Pravidla pro posouzení úhelníků (připojených jedním, dvěma či více šrouby), která jsou obsažená v normě, ovšem nelze použít. Rovněž nelze použít ustanovení týkající se návrhu přípojných úhelníků. Původní pravidla předepisují zejména poměrné zvýšení sil v jednotlivých částech spoje. Jak postupovat v případě ocelí třídy S 500 – S 700, norma [13] nestanovuje.
- Rozdělení sil mezi šrouby nebo nýty v MSÚ: Ve styčníku, který je namáhán momentem, se mají síly rozdělit pružně.
- Pevnostní třída elektrod použitých pro svary: Pro běžné oceli se používají přídavné materiály (elektrody) se stejnými nebo vyššími

hodnotami jmenovité meze kluzu, meze pevnosti v tahu, tažnosti a vrubové houževnatosti než je stanoveno pro základní materiál. Pro oceli z tab. 4 je dovoleno používat elektrody s nižší pevností, než má základní materiál. V národních přílohách mohou být pro používání takových elektrod stanoveny další podmínky. Obdobně se má postupovat i při návrhu tupých svarů. Pokud jsou pro provedení svaru použity elektrody s nižší pevností než je pevnost základního materiálu, výpočet únosnosti svaru má být založen na pevnosti elektrody f_{eu}.

- Dlouhé svarové spoje: U přeplátovaných spojů prvků z ocelí podle tab. 4 se nemají používat delší koutové svary než 50*a*, kde *a* je účinná tloušťka svaru. Pokud se použije delší svar, mělo by se ve výpočtu zohlednit nerovnoměrné rozdělení namáhání. Jak nerovnoměrné rozdělení zohlednit, norma neudává.
- Globální analýza, klasifikace a modelování styčníků: Obecně lze z pohledu globální analýzy rozlišit tři základní modely styčníků: kloubový (nepřenáší ohybový moment), částečně spojitý (chování styčníku v globální analýze nutno zohlednit), spojitý (nemá vliv na globální analýzu). Vhodný model styčníku se určuje podle zvolené metody analýzy a klasifikace styčníku. Podle normy [13] nelze pro oceli z tab. 4. aplikovat ustanovení z [9] týkající se tuho-plastické globální analýzy, pružně-plastické globální analýzy, polotuhých styčníků.
- Patky sloupů: Pro prvky z ocelí z tab. 4. smí být použita pravidla [9] pro patky sloupů namáhané ohybovým momentem za předpokladů, že rozdělení sil v kotevních šroubech je pružné a rozhodující pro únosnost patky je únosnost kotevního šroubu.
- Styčníky dutých průřezů: Statická návrhová únosnost styčníků dutých průřezů se pro výrobky se jmenovitou mezí kluzu vyšší než 355 MPa má redukovat součinitelem 0,9. Pro oceli z tab. 4 se použije redukční součinitel 0,8.

ČSN EN 1993-1-9 Únava [10]

Jediná poznámka se týká nosníků s pásnicemi a stěnami z různých materiálů. Pokud nosník splňuje podmínku $f_{yf} = \phi_h f_{yw}$, omezení $\Delta\sigma \leq 1{,}5\ f_y$ má být aplikováno na pásnici. Ve vztazích značí f_{yf} mez kluzu materiálu pásnice, f_{yw} mez kluzu materiálu stěny a $\Delta\sigma$ rozkmit napětí.

ČSN EN 1993-1-10 Křehký lom [11]

Norma udává tabulku maximálních dovolených tlouštěk prvků pro oceli z tab. 4.

Normy, které lze použít bez omezení

Bez omezení lze pro oceli z tab. 4 používat následující normy:
ČSN EN 1993-1-2 (požár) [3], ČSN EN 1993-1-3 (tenkostěnné konstrukce) [4], ČSN EN 1993-1-5 (boulení stěn) [6], ČSN EN 1993-1-7 (deskostěny) [8], ČSN EN 1993-1-11 (tažené prvky) [12] ,ČSN EN 1993-2 (ocelové mosty) [14], ČSN EN 1993-3 (věže, stožáry, komíny) [15, 16], ČSN EN 1993-4 (zásobníky, nádrže, potrubí) [17, 18, 19], ČSN EN 1993-5 (piloty a štětové stěny) [20] a ČSN EN 1993-6 (jeřábové dráhy) [21].

4. Příklady použití

S ohledem na výše uvedené skutečnosti lze uvést druhy konstrukcí a konstrukčních prvků, pro něž je použití ocelí vyšších pevností nejvýhodnější:

Gigantické mosty

Je možné téměř generalizovat skutečnost, že s rostoucí velikostí stavby roste i efektivita použití kvalitnějších ocelí. U velkých mostů je obvykle snadné eliminovat průhyb způsobený menšími průřezy konstrukčních prvků výrobním nadvýšením, popřípadě vytvořit konstrukční systém málo náchylný k velkým průhybům. Rovněž většinou odpadají problémy s únavou. Uveďme známé příklady konstrukcí velkých evropských mostů:
viadukt Millau s použitím 40 000 tun oceli S 460 M/ML, most *Øresund* mezi Švédskem a Dánskem s použitím 25 500 tun různých ocelí třídy S 460, nizozemské mosty *Erasmus*, *Ennëus Heerma*, *Prince Claus* a most přes *Hollandsch Diep* obvykle s kombinací S 460 a S 355, japonské mosty *Akahi – Kaikyó* s použitím ocelí tříd HT 690 a HT 780, *Tokyo Gate bridge* (S 500) a řada dalších.

Výškové budovy

Významným konstrukčním prvkem, pro který je aplikace oceli vyšší pevnosti velmi výhodná, je sloup. Jak již bylo naznačeno v kapitole 1.2, dodavatelé se zaměřují převážně na větší průřezy (např. Arcelor dodává válcované profily od výšky 260 mm). Tyto prvky nacházejí velmi výhodné uplatnění pro vzpěrné délky okolo 3,5 m, což dobře koresponduje s obvyklými stavebními výškami podlaží obytných skeletů.

Konstrukce garáží

Méně známým příkladem uplatnění konstrukčních prvků z ocelí vyšších pevností jsou stavby sloužící pro parkování. Parkovací prostory je obvykle nutno dispozičně uspořádat tak, aby vzdálenosti mezi sloupy byly co největší a přitom nebyla zvyšována konstrukční výška podlaží. Zkušenosti z evropských zemí (zejména z Německa) ukazují, že pro garážové stavby lze výhodně použít válcované nosníky z oceli S 460 pro rozpětí okolo 15 m. Nosníky jsou nadvýšené a konstruují se buď jako samostatně působící doplněné o prefabrikovanou betonovou desku, nebo jako spřažené s betonovou deskou.
Na obr. 6 je příklad Parkhausu z Lucemburska. Jde o skelet s nadvýšenými nosníky IPE 450 z oceli HISTAR 460 na rozpětí 15,80 m podpíranými sloupy z profilů HD z oceli HISTAR 500.

Obr. 6.: *Garáže v Lucemburku [33]*

Příhradové nosníky

Konstrukce s příhradovými nosníky z ocelí vyšších pevností jsou hospodárné zejména v okamžiku, kdy pro jejich prvky můžeme využít běžně dodávané válcované profily. Takový předpoklad obvykle splňují konstrukce velkých rozpětí (válcované tyče HE od výšky 260 mm). Prvky příhradových nosníků nevyžadují obvykle plastickou rezervu a odpadají rovněž problémy s průhybem. Velké rovinné i prostorové příhradové konstrukce je možno uplatnit při stavbách nákupních center a jiných hal velkých rozpětí.

Spřažené mosty středních rozpětí

Oceli vyšších pevností lze účelně využít také pro spřažené trámové mosty středních rozpětí (cca 15 – 35 m), zejména silniční. V západní Evropě (Francie, Německo, Lucembursko) byla postavena řada takových mostů,

kde trámy byly tvořeny válcovanými profily z oceli S 460, resp. S 420. Výrobci jsou připraveni pro takové účely dodat nosníky délky do 34 m, v mimořádném případě až 45 m, záleží pouze na přepravních možnostech. Válcované nosníky na takových mostech vypadají velmi elegantně a staticky méně hospodárná symetrie průřezu je obvykle bohatě vynahrazena malou výrobní pracností. Betonovou desku je obvykle možné vytvořit z betonu běžné jakosti, může být i prefabrikovaná. Její tloušťku lze ovlivnit počtem hlavních trámových nosníků.

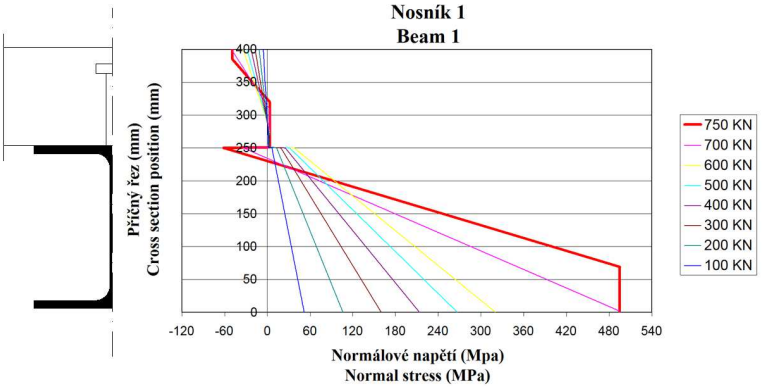
5. Výzkum vysokopevnostních ocelí na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí stavební fakulty ČVUT v Praze

Na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí probíhá již několik let výzkum chování prvků z ocelí vysokých a vyšších pevností. V následující kapitole jsou stručně shrnuta hlavní témata těchto prací.

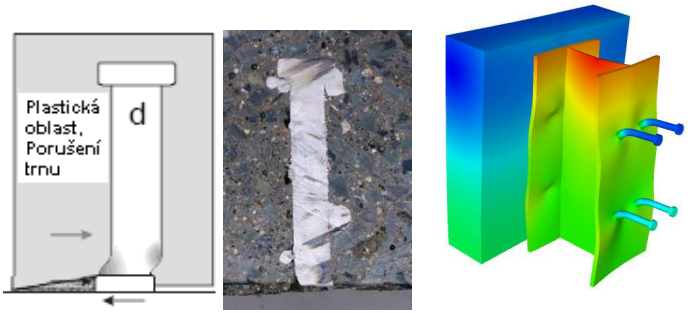
5.1 Spřažené ocelobetonové nosníky (Tunega, Dolejš)

Výzkum probíhal v letech 2004 až 2011. Byl zaměřen na spřažené ocelobetonové nosníky z oceli S 460 a vysokohodnotného betonu C 70/85. Byly provedeny zkoušky nosníků, protlačovací zkoušky, materiálové zkoušky, numerická analýza chování a analýza porušení spřahovacího trnu. Byly použity spřahovací trny z oceli běžné třídy (f_u = 340 MPa). Výzkum byl zaměřen na popis napětí v příčném řezu spřaženého nosníku a na analýzu chování spřahovacího trnu při úplném a částečném spřažení.

Obr. 7.: *Zkouška spřaženého nosníku [31]*



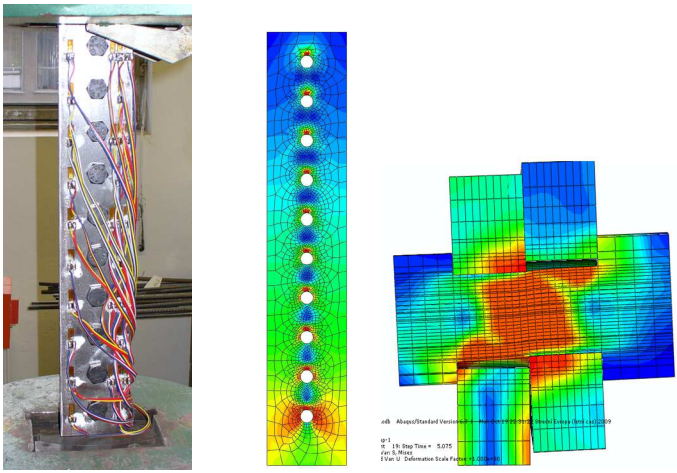
Obr. 8.: *Zkouška spřaženého nosníku a průběh normálového napětí na příčném řezu [31]*



Obr. 9.: *Analýza chování spřahovacího trnu ve vysokohodnotném betonu [31]*

5.2 Šroubové spoje (Hatlman, Dolejš)

Výzkum probíhal v letech 2006 až 2012 a hlavním tématem byl dlouhý šroubový přípoj prvků z oceli S 960. Únosnost dlouhého spoje je závislá na rozdělení sil na jednotlivé šrouby. Byla provedena experimentální a numerická analýza jednostřižného spoje s 10 a 15 nepředepnutými šrouby. Bylo zjištěno, že průběh normálového napětí na oslabeném řezu plechu je obdobný jako u běžných ocelí. Z provedených analýz vyplynulo, že díky nižší tažnosti vysokopevnostní oceli jsou rozdíly mezi namáháním krajních a vnitřních šroubů větší než u běžných ocelí. Významnou roli hrají výrobní geometrické imperfekce, tedy nepřesnosti provedení. Na obr. 10 je vidět experiment se spojem s 10 šrouby, normálové napětí na povrchu plechu zjištěné numerickou simulací a srovnávací napětí H-M-H v řezu šroubem.



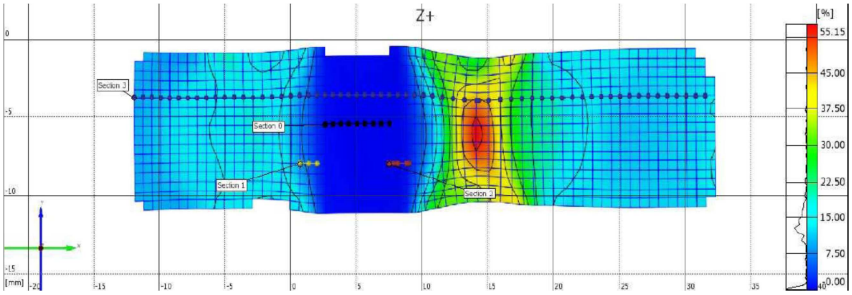
Obr. 10.: *Zkouška dlouhého spoje (vlevo) a výstupy numerické simulace (program Abaqus) [27]*

5.3 Svarové spoje (Brtník, Dolejš)

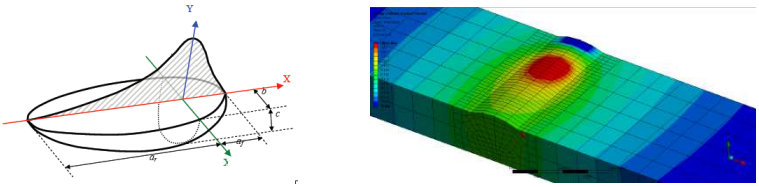
Výzkum probíhá od roku 2009 a je zaměřen na tupé svary prvků z vysokopevnostních ocelí. Předmětem výzkumu je vliv mechanických vlastností elektrod a množství vneseného tepla na mechanické vlastnosti svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Jsou testovány dvě vysokopevnostní oceli třídy S960 tloušťky 6 mm. Jedná se o termomechanicky válcovanou ocel DOMEX 960 a kalenou ocel OPTIM 960 QC.

Ke svařování je použita metoda MAG. Pro svaření vzorků jsou použity vždy dva vstupy tepla 0,55 kJ/mm a 1,0 kJ/mm. První je v doporučeném intervalu pro dobu ochlazování $t_{8/5}$ a druhý mírně nad horní hranicí tohoto intervalu. Druhá varianta vstupu tepla simuluje možné drobné chyby v technologickém postupu při svařování v exteriéru. Elektrody používané k svařování jsou třech pevnostních tříd s mezemi kluzu 790, 890 a 1000 MPa. Elektrody nižších pevností mohou být pro spojování vysokopevnostních ocelí výhodnější díky vyšší tažnosti, přičemž dle provedených studií i teoretických výpočtů by u tupých svarů pro elektrody nižších pevností mělo být možné použití elektrod s pevností nižší až o 15% oproti základnímu materiálu bez ztráty pevnosti svarového spoje. Termomechanicky válcované vysokopevnostní oceli mají rozdílné vlastnosti v závislosti na směru válcování. Z tohoto důvodu jsou testy prováděny na vzorcích vyřezaných v obou na sebe kolmých směrech. Geometrie svarů je V a ½-V s úhlem 55° a mezerou mezi deskami vždy 1 mm. Měření tahových vzorků je prováděno současně v laboratořích stavební fakulty ČVUT v Praze a laboratořích kooperující univerzity v Kemi-Tornio (Finsko). Testy prováděné ve Finsku

jsou prováděny a měřeny jak klasickým způsobem pomocí extensometrů, tak i pomocí optického systému Gom Aramis, který umožňuje detailní zachycení a vyhodnocení průběhu tahové zkoušky (obr. 11.).



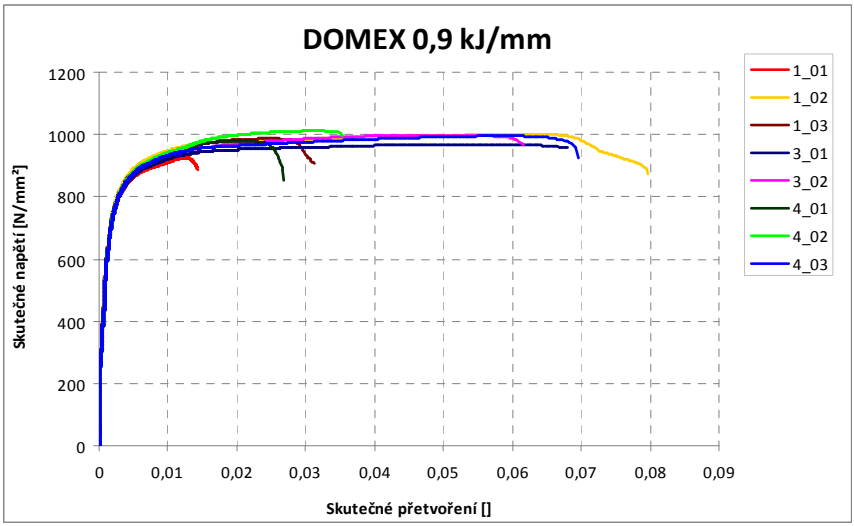
Obr. 11.: *Vyhodnocení tahové zkoušky systémem Aramis*



Obr. 12.: *Goldakův model zdroje tepla využívaný v numerických simulacích k vnesení reziduálních napětí (vlevo) a jeho aplikace v MKP software ANSYS (vpravo).*

Zjištěné mechanické vlastnosti slouží částečně jako vstupy do numerických analýz. Ty jsou prováděny ve více úrovních podrobnosti. V první úrovni s uvážením nelineárního materiálu, v druhé s nelineárním materiálem a reziduálním napětím vlivem vneseného tepla a ve třetí úrovni navíc s výpočtem mechanických vlastností na základě fázových přeměn vlivem změn teplot v čase. K numerickým modelům jsou využívány programy Ansys, MSC.Marc a Sysweld.

Cílem výzkumu je ověřit možnost využití vysokopevnostních ocelí třídy S960 pro účely dopravních a pozemních staveb, což v případě komplikovaných konstrukcí přináší nesnáze vzhledem k nemožnosti strojního svařování na dílně a tudíž obtížněji splnitelnými technologickými nároky, které jsou v případě vysokopevnostních ocelí výrazně vyšší, než je tomu u běžných ocelí. Dalším aspektem výzkumu jsou možnosti predikce únosnosti a mechanických vlastností svarů numerickými metodami.



Obr. 13.: *Vyhodnocení tahové zkoušky pro vstup tepla 0,9 kJ/mm a elektrodu MF 742 s mezí kluzu 790 MPa.*

6. Závěr

Vysokopevnostní oceli patří mezi progresívní stavební materiály. Ačkoliv cena za jednotku je vyšší než u běžných ocelí, je třeba mít na zřeteli druhotné náklady (doprava, svary, montáž, demontáž, ekologická zátěž apod.), které jsou obecně nižší. Na světovém trhu jsou dnes běžně k dispozici oceli až do pevnostní třídy S 1100. Normová podpora v Evropě již byla vytvořena, na stavební konstrukce je možné používat oceli až do třídy S 700. Vysokopevnostní oceli se vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi, pouze nižší tažnost omezuje jejich plastické chování. Jsou vhodné zejména pro gigantické mosty, příhradové nosníky, výškové budovy a spřažené konstrukce. Na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí stavební fakulty ČVUT v Praze probíhá dlouhodobý výzkum vysokopevnostních ocelí pro použití ve stavebnictví.

Literatura

[1] ČSN EN 1993-1-1 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 2006, vč. Změny NA ed. A, ČNI 2007, Opravy Opr. 1, ÚNMZ 2010, Změny Z1, ÚNMZ, 2010, Změny Z2 a Z3, ÚNMZ 2011.

[2] ČSN P ENV 1993-1-1 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 1994, vč. Změny A1, ČNI 1997.

[3] ČSN EN 1993-1-2 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI 2006.

[4] ČSN EN 1993-1-3 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-3: Doplňující pravidla pro tenkostěnné a za studena tvarované prvky a plošné profily, ČNI 2008.

[5] ČSN EN 1993-1-4 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-4: Obecná pravidla - Doplňující pravidla pro korozivzdorné oceli, ČNI 2008.

[6] ČSN EN 1993-1-5 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn, ČNI 2008.

[7] ČSN EN 1993-1-6 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí, ČNI 2008.

[8] ČSN EN 1993-1-7 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-7: Deskostěnové konstrukce příčně zatížené, ČNI 2008.

[9] ČSN EN 1993-1-8 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků, ČNI 2006.

[10] ČSN EN 1993-1-9 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava, ČNI 2006.

[11] ČSN EN 1993-1-10 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-10: Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou, ČNI 2006.

[12] ČSN EN 1993-1-11 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-11: Navrhování ocelových tažených prvků, ČNI 2008.

[13] ČSN EN 1993-1-12 - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-12: Doplňující pravidla pro oceli vysoké pevnosti do třídy S 700, vč. Změny NA ed. A, ÚNMZ 2010, Opravy Opr. 1, ÚNMZ 2010, Změny Z1, ÚNMZ, 2010.

[14] ČSN EN 1993-2 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty, ČNI 2008.

[15] ČSN EN 1993-3-1 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 3-1: Stožáry a komíny - Stožáry, ČNI 2008.

[16] ČSN EN 1993-3-1 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 3-2: Stožáry a komíny - Komíny, ČNI 2008.

[17] ČSN EN 1993-4-1 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-1: Zásobníky, ČNI 2008.

[18] ČSN EN 1993-4-2 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-2: Nádrže, ČNI 2008.

[19] ČSN EN 1993-4-3 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-3: Potrubí, ČNI 2008.

[20] ČSN EN 1993-5 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 5: Piloty a štětové stěny, ČNI 2008.

[21] ČSN EN 1993-6 – Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 6: Jeřábové dráhy, ČNI 2008.

[22] Clarin, M.: High Strength Steel, Local Buckling and Residual Stresses, Luleå University of Technology, www.ltu.se, ISSN: 1402-1757, 2004, 163 s.

[23] Dolejš, J. - Brtník, T. - Toppila, R. - Kauppi, T. - Joutsenvaara, J. - et al., Investigation of Behaviour of HSS Using Advanced Techinques, In: Proceedings of

the METNET Seminar 2011 in Aarhus. Hämeenlinna: HAMK University of Applied Sciences, 2011, ISBN 978-951-784-556-4, s. 23-35.
[24] Gogou, E.: Use of High strength Steel Grades for Economical Bridge Design, TU Delft, 2012, 224 s.
[25] Gozzi, J.: Plastic behaviour of Steel, Luleå University of Technology, www.ltu.se, 2004, 203 s.
[26] Günther, H.-P. a kol.: Use and Application of High-Performance Steels for Steel Structures, ISBN 3-85748-113-7, IABSE 2005, 152 s.
[27] Hatlman, V.: Dlouhý šroubovaný spoj prvků z vysokopevnostních ocelí, disertační práce, ČVUT v Praze 2012.
[28] Herman, P.: prezentace společnosti WIRPO, 2010.
[29] Hever, M, Schröter, F.: Modern steel – high performance material for high performance bridges. 5-th International symposium on steel bridges, Barcelona 2003.
[30] Schröter, F.: Steel products for recent bridge constructions. Sborník First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Barcelona 2002.
[31] Tunega, I.: Částečné spřažení ocelobetonových nosníků z materiálů vyšších pevností In: Sborník semináře doktorandů katedry ODK. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2008, s. 54-57. ISBN 978-80-01-04107-9.
[32] Interní materiály autora.
[33] Internetové prezentace

Autor a CV

Dr. Ing. Jakub Dolejš
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, ČVUT v Praze – fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 –Praha 6
e-mail: dolejs@fsv.cvut.cz
datum a místo narození: 17. května 1971, Plzeň

Vzdělání:

1989 – 1994	Fakulta stavební ČVUT v Praze, Studijní obor Konstrukce a dopravní stavby (Ing.)
1994 – 1998	Fakulta stavební ČVUT v Praze, Studijní obor Konstrukce a dopravní stavby, katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, dizertační práce: Nedestruktivní vyšetřování mechanických vlastností dřeva (Dr.)

Zaměstnání:

1997-2000	projektant mostů a inženýrských konstrukcí, SUDOP PRAHA, a. s., Olšanská 1a, Praha 3
2000-2002	specialista na halové systémy, Lindab, s. r. o. Na Hůrce 1081/6, Praha 6 (současná adresa)
2002-2003	projektant mostů (Tchaj-wan, Thajsko, Kostarika), VCE - Vienna Consulting Engineers Hadikgasse 60, 1140 Vienna Austria a Novák & Partner, Perucká 2481/5, 120 00 Praha 2, pracoviště VCE, Taiwan branch, Taipei, Taiwan
2003- dosud	odborný asistent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze, fakulta stavební, Thákurova 7, Praha 6

Pedagogická činnost:
Přednášky: Dřevěné konstrukce 2, Ocelové a dřevěné konstrukce v architektuře 2, Speciální ocelové a dřevěné konstrukce, Speciální ocelové konstrukce, Laboratoř nosných konstrukcí, Pomocné ocelové a dřevěné konstrukce
Dále: vedení diplomových a bakalářských prací, vedení projektů, cvičení a laboratorních cvičení.

Oblasti výzkumu:

Lešení, ocelobetonové konstrukce, vysokopevnostní oceli, Vyšetřování mechanických vlastností dřeva, Sendvičové panely pro dřevostavby, ocelové skořepiny
Podílel se na řešení Výzkumného záměru MSM „Optimalizace a spolehlivost“ 2006-2011, několika výzkumných projektů poskytovatelů MŠMT, GAČR, MDČR a na řešení interních grantů ČVUT.

Členství v organizacích a komisích:
ECCS TC 11 – Composite structures
TNK 92 – Lešení
ČKAIT – autorizovaný inženýr pro statiku a dynamiku staveb
Znalec v oboru Stavebnictví, stavební odvětví různá, specializace statika ocelových konstrukcí
IABSE – International Association for Bridge and Steel Engineering
Dále nominace českých národních skupin na spolupráci s CEN 53 – Scaffolding - Lešení (Nominován ÚNMZ), UEG – Union Europäischer Gerüstbaubetriebe - Evropská unie lešenářů (Nominován Českomoravskou komorou lešenářů)

Vybrané publikace 2008-2012:
- Wald, F. - Macháček, J. - Jandera, M. - Dolejš, J. - Sokol, Z. - et al. Structural Steel Design according to Eurocodes, 1. ed. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012. 197 p. ISBN 978-80-01-05046-0.
- Wald, F. - Macháček, J. - Jandera, M. - Dolejš, J. - Sokol, Z. - et al. Design of Steel Structures with Worked Examples to EN 1993-1-1 and EN 1993-1-8 1. ed. Singapore: Research Publishing Services, 2011. 175 p. ISBN 978-981-08-9441-2.
- Dolejš, J. - Macháček, J. - Vraný, T. - Wald, F. Ocelové konstrukce - textové materiály Praha: ČVUT v Praze, 2008. 186 s. ISBN 978-80-01-04128-4.
- Wald, F. - Macháček, J. - Vraný, T. - Sokol, Z. - Dolejš, J. (ed.) Základy navrhování ocelových konstrukcí podle ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8
  1. vyd. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí (ČAOK), 2010. 198 s. ISBN 978-80-904535-0-0.
- Dolejš, J. - Vlasák, S. - Vlasák, M. - Škréta, K. - Picek, Z. Navrhování konstrukcí z lešení I, Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2011. 260 s. ISBN 978-80-01-04363-9.

- Dolejš, J. - Vlasák, S. - Vlasák, M. - Picek, Z. - Zvěřina, F., Navrhování konstrukcí z lešení II, Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2012. 212 s. ISBN 978-80-01-04960-0.
- Dolejš, J. Kroucení prutu otevřeného a uzavřeného průřezu podle ČSN EN 1993-1-1 In: Ocelové a dřevěné konstrukce - Řešené příklady. Praha: ČVUT FSv, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 2009, s. 48-58. ISBN 978-80-01-04398-1.
- Dolejš, J., Tažené prvky podle ČSN EN 1993-1-11In: Ocelové, hliníkové a dřevěné konstrukce v evropských normách. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, s. 37-52. ISBN 978-80-01-03962-5.
- Dolejš, J. - Wald, F. Lešení a žebříky In: Nové Rochlovy stavební tabulky 2. Praha: INCON-F s.r.o., Michalská 12, 110 00 Praha 1, 2010, s. 333-339. ISBN 978-80-903889-2-5.
- Wald, F. - Rotter, T. - Studnička, J. - Macháček, J. - Kuklík, P. - et al., K navrhování ocelových, dřevěných a skleněných konstrukcí, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2012. 146 s. ISBN 978-80-01-05082-8.
- Dolejš, J. Zatížení konstrukcí větrem podle ČSN EN 1991-1-4, In: Softwarová podpora návrhu ocelových a dřevěných konstrukcí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, s. 15-25. ISBN 978-80-01-04610-4.
- Dolejš, J. - Hatlman, V. - Tunega, I. Experiments with high Performance Steel and Composite Members, In: Zeszyty naukou Politechniki Rzeszowskiej. 2009, vol. 52, no. 264, p. 33-42. ISSN 0209-2646.
- Pošta, R. - Dolejš, J., Steel Reinforced Ducts Stressed by Temperature, In: Procedia Engineering [online]. 2012, vol. 40, no. 40, p. 381-386. Internet: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812024988. ISSN 1877-7058.
- Dolejš, J. - Sedláček, M., Posouzení důlní ocelové lichoběžníkové výztuže podle ČSN EN 1993-1-1 EUROKÓD 3, In: Tunel. 2011, roč. 3, č. 3, s. 66-78. ISSN 1211-0728.
- Dolejš, J. - Brtník, T. - Toppila, R. - Kauppi, T. - Joutsenvaara, J. - et al., Investigation of Behaviour of HSS Using Advanced Techinques, In: Proceedings of the METNET Seminar 2011 in Aarhus. Hämeenlinna:

HAMK University of Applied Sciences, 2011, p. 23-35. ISBN 978-951-784-556-4.

- Pošta, R. - Dolejš, J., Stiffened steel cylindrical shells at elevated temperature, In: Eurosteel 2011 6th European Conference on Steel and Composite Structures. Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2011, vol. 1, p. 867-872. ISBN 978-92-9147-103-4.
- Brtník, T. - Dolejš, J., Welds of High Strength Steel Members In: Young Scientist 2010 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, 2010, ISBN 978-80-553-0391-8.
- Hatlman, V. - Dolejš, J., Long Bolted Joint of High Strength Steel Members, In: Eurosteel 2008 - 5th European Conference on Steel and Composite Structures. Brussel: ECCS/CECM/EKS General Secretariat, 2008, vol. A, p. 693-698. ISBN 92-0147-000-90.
- Pošta, J. - Dolejš, J. In situ non-destructive examination of timber elements, In: Research Conference on Information Technology. Komló: Rotari Press, 2011, p. C118. ISBN 978-963-7298-46-2.