

**Rekonštrukcia mosta „Kladzany“
a rekonštrukcia mosta „Ondava“**

**Posúdenie vlastností ocele pôvodnej
konštrukcie Starého mosta**

Dátum vydania	04.08.2016	Počet výtlačkov:	Výtlačok číslo:
Riešiteľ:	Ing. Martin Vitásek, PhD.		
Spoluriešiteľ:			
Skontroloval:	Mgr. Martin Vitásek		
Schválil:	Mgr. Martin Vitásek		

1 Úvod

Pri rekonštrukcii mostov „Kladzany“ a „Ondava“ sa plánujú použiť časti konštrukcie Starého mosta cez Dunaj v Bratislave. Túto ocelovú konštrukciu budeme v tomto dokumente nazývať „OK – SM“. OK - SM dodala v roku 1985 mostáreň Vítkovice, montáž vykonali Hutní montáže Ostrava. Napriek tomu, že sa OK - SM realizovala v nie veľmi vzdialenej minulosti, nezachovala sa všetka technická dokumentácia, ktorá by poskytla informácie o použitom materiáli (konštrukčnej oceli) nevyhnutné pre bezpečné projektovanie. V technickej dokumentácii, ktorá je v súčasnosti dostupná, je k dispozícii jedine informácia, že ocelové plechy, z ktorých sa nová konštrukcia vyrobila, boli vyhotovené z ocelí značiek **11 375** a **11 378**. V dokumentácii ale chýba rozčlenenie, ktoré z konštrukčných prvkov sú vyrobené z ktorej ocele. Chýba tiež informácia o počte použitých taviieb ocelí ako aj informácia o vlastnostiach jednotlivých plechov (skupín vývalkov). Je možné predpokladať, že tieto informácie boli uvedené v hutných atestoch dodaných k polotovaram (ocelovým plechom), z ktorých sa vyrobila OK - SM, ale v súčasnosti nie sú dostupné.

Vykonať všetky skúšky materiálov OK – SM, ktoré by nahradili chýbajúce hutné atesty by bolo v tomto prípade technicky ťažko realizovateľné a ekonomicky veľmi náročné a s ohľadom na plánované použitie asi ani nie nevyhnutné. Preto sa prijalo rozhodnutie vykonať aspoň niektoré výberové skúšky, ktoré by poskytli projektantovi obraz o skutočných vlastnostiach materiálov. Skúšky sa vykonali v 2 za sebou nasledujúcich etapách.

V 1. etape sa vykonali predbežné skúšky na styčnickovom plechu (v ďalšom texte iba „skúšky SP1“ resp. iba „SP1“ podľa kontextu) s hrúbkou 20 mm, odobratom z OK – SM.

V 2. etape sa vykonali doplňujúce skúšky na častiach OK – SM a doplňujúce skúšky na 2. styčnickovom plechu, (v ďalšom texte iba „skúšky SP2“ resp. iba „SP2“ podľa kontextu).

Predložená správa sumarizuje a vyhodnocuje výsledky skúšok vykonaných v 1. aj 2. etape.

2 Všeobecné údaje o skúšaných materiáloch

Požiadavky na vlastnosti ocelí 11 375 a 11 378 špecifikujú normy ČSN 41 1375 [1] a ČSN 41 1378 [2]. Oceľ 11 375 je podľa ČSN 42 002 [3] a ČSN 41 1375 označená ako konštrukčná nelegovaná oceľ obvyklej akosti. Oceľ 11 378 je podľa ČSN 41 1378 označená ako nelegovaná akostná oceľ pre ocelové konštrukcie. Podľa materiálových listov ocele 11 375 (ČSN 41 1375) a ocele 11 378 (ČSN 41 1378) sa z obidvoch značiek ocelí v minulosti vyrábal široký sortiment hutníckych výrobkov (tyče, drôty, tvarové tyče, pásy, tenké a hrubé plechy, široká oceľ a výkovky).

Hrubé plechy¹, ktoré sa použili na výrobu OK – SM, sa vyrábali valcovaním za tepla a následne sa normalizačne žihali. Odporúčaná teplota normalizačného žihania bola v prípade obidvoch ocelí leží v rozmedzí 900 až 930 °C.

¹ Hrubé plechy sú plechy s hrúbkou nad 3 mm.

Požiadavky noriem [1] a [2] na mechanické vlastnosti hrubých plechov sú uvedené v Tabuľke 1. V Tabuľke 2 sú uvedené požiadavky na chemické zloženie hrubých plechov.

Rozdiel medzi uvedenými značkami ocelí spočíva predovšetkým v odlišných požiadavkách na nárazovú prácu Charpy V. Pre hrubé plechy² a ďalšie valcované výrobky z ocele 11 375 sa požaduje skúška nárazovej práce iba pri +20 °C, kým pre hrubé plechy valcované z ocele 11 378 sa požaduje skúška nárazovej práce pri 0 °C a pre normalizačne žíhané plechy skúška pri teplote -20 °C.

Pri posudzovaní vhodnosti dielcov OK – SM je potrebné dodať, že pre hutnícke polotovary (vrátane za tepla valcovaných plechov) vyrábané z konštrukčných ocelí v bývalej ČSSR bol charakteristický veľký rozptyl materiálových vlastností a parametrov. Ako príklad možno uviesť niektoré výsledky výskumu VÚHŽ Dobrá [4] z roku 1977. Ten ukázal, že v prípade ocele 11 375 sa vyskytli prípady, kedy medza klzu ojedinele dosiahla namiesto požadovaných 235 MPa (hrúbky do 16 mm) resp. 225 MPa (hrúbky 16 až 40 mm) iba 180 MPa. Podstatne častejšie boli prípady prekročenia požadovanej minimálnej medze klzu, výnimočne až na úroveň presahujúcu dvojnásobok požadovanej minimálnej hodnoty. V prípade ocele 11 378, ktorá bola zaradená do vyššej akostnej triedy, sú prípady podkročenia medze klzu výrazne menej časté a týkali sa iba plechov vyrobených vo Válcovniach Frýdek-Mýstek. Rozhodujúca časť produkcie ocelových plechov obidvoch značiek (11 375 aj 11 378) zabezpečovali v 70-tych a 80-tych rokoch Vítkovické železiarne KG. Tieto skutočnosti sa zohľadnili aj pri návrh rozsahu skúšok a meraní.

3 Výber a metodika skúšok a meraní

V rámci skúšok materiálov OK – SM sa vykonali nasledujúce skúšky a merania:

- skúška chemického zloženia (skúšky SP1 aj OK - SM),
- skúška ťahom (iba skúšky SP1),
- skúška rázom v ohybe (skúšky SP1, OK – SM a SP2),
- skúška tvrdosti (iba skúšky OK - SM),
- meranie hrúbky (iba skúšky OK - SM).

Skúška chemického zloženia

V prípade skúšok SP1 sa skúška chemického zloženia vykonala v akreditovanej skúšobni SES Inspekt, s.r.o. Tlmače metódou atómovej emisnej spektrometrie (prvky: C, Mn, Si, P, S, Cr, Ni, Mo, Cu, Nb, Ti, V, Al) na laboratórnom analyzátore SPECTROMAX. Táto metóda je založená na sledovaní emisie elektromagnetického žiarenia voľnými atómami látok v plynnom stave. Atomizáciu a budenie atómov vyvoláva elektrická iskra medzi povrchom skúmanej látky a volfrámovou elektródou. Nadbytočná energia atómov sa vyžiarí vo forme charakteristických spektier. Vlnové dĺžky spektrálnych čiar určujú prítomnosť prvkov vo vzorke. Intenzita čiar závisí od koncentrácie prvkov vo vzorke.

Skúška sa vykonala na obrúsenom kovovom povrchu SP1. V priebehu skúšky sa vykonali 3 separátne merania na rôznych miestach povrchu. Namerané obsahy jednotlivých prvkov sa nakoniec spriemerovali.

² V pôvodných ČSN normách ocelí sú plechy s hrúbkou $t \geq 3$ mm označované ako hrubé plechy.

Obsah dusíka (N) sa stanovil termoevolučnou metódou s meraním tepelnej vodivosti. V rámci tejto metódy sa taví vzorka v grafitovom kelímku v peci v prúde nosného inetrtného plynu (hélium) pri teplote 2100 až 2700 °C. Dusík sa uvoľňuje vo forme N₂ a jeho obsah sa kvantifikuje meraním tepelnej vodivosti.

V prípade skúšok OK skúšku chemického zloženia vykonala firma SEPS, a.s. mobilným spektrálnym analyzátorom PMI – MASTER Smart priamo na skládke v Prešove. Mobilný analyzátor využíva vyššie uvedenú metódu atómovej (optickej) emisnej spektroskopie.

Skúška chemického zloženia sa vykonala na 20-ich rôznych miestach (meracích bodoch) na OK – SM, ktoré boli dostupné meracím zariadením³. Meracie body sa nachádzali na vonkajšom povrchu materiálu (na vonkajšom povrchu plechov). Pred začiatkom merania sa povrch materiálu v mieste meracích bodov obrúsil od farby, hrdze a iných nečistôt až na kovový povrch. Na každom meracom mieste sa vykonali minimálne 3 merania, ktorých výsledky sa uviedli do protokolov vrátane vypočítanej priemernej hodnoty obsahu jednotlivých prvkov.

Nakoľko mobilný spektrálna analyzátor neumožňuje analýzu obsahu dusíka, vykonala sa doplnková chemická analýza na stacionárnom spektrálnom analyzátoe OXFORD vo VÚZ – PI metódou atómovej emisnej spektroskopie, ktorý umožňuje analyzovať aj obsah dusíka. V tomto prípade ale analyzátor nebol kalibrovaný na obsah P a S, preto namerané hodnoty nebrali do úvahy. Analýza bola vykonaná na priečnom reze materiálu vyrezaného z dolnej pásnice dielca HL-H4 s hrúbkou 40 mm.

Skúška ťahom

Skúška ťahom sa vykonala v akreditovanej skúšobni SES Inspekt, s.r.o., Tlmače. Skúška pozostáva z výroby štandardizovaných skúšobných tyčí, ktoré sa následne trhajú v skúšobnom stroji. V priebehu skúšky sa meria zaťažujúca sila a okamžitá deformácia tyče, z ktorých sa zostavuje ťahový diagram deformácia – napätie ($\sigma - \varepsilon$). Z ťahového diagramu sa určujú základné mechanické charakteristiky: medza klzu R_e, medza pevnosti R_m, ťažnosť A₅ a kontrakcia Z.

Skúška sa vykonala na 4 skúšobných tyčiach vyrobených z SP1 pri teplote +20 °C podľa STN EN ISO 6892-1 [5]. Nakoľko nebola známa orientácia plechu voči smeru valcovania, 2 tyče sa orientovali v smere rovnobežnom s pozdĺžnou stranou plechu a 2 tyče v smere kolmom na pozdĺžnu stranu styčnickového plechu, aby bolo možné porovnať mechanické vlastnosti v obidvoch smeroch.

Skúška rázom v ohybe

Skúška rázom v ohybe sa vykonala v akreditovanej skúšobni SES Inspekt, s.r.o., Tlmače. Skúška pozostáva z výroby štandardizovaných skúšobných tyčí Charpy V, ktoré sa následne prerážajú (lámu) na kalibrovanom Charpyho kladive PSW 300. Skúšobné tyče majú štandardizovaný rozmer 55 x 10 x 10 mm s V vrubom hlbokým 2 mm a polomerom krivosti v koreni vrubu 0,25 mm. V priebehu skúšky sa meria energia potrebná na prerazenie (prelomenie) skúšobných tyčí. Veľkosť nameranej energie je mierou húževnatosti materiálu.

³ Mobilný spektrálny analyzátor sa s ohľadom na svoju hmotnosť (cca 25 kg) môže presúvať iba po primerane rovnej ploche. Jeho dosah zväčšuje prenosný merací nadstavec na konci cca 4 m dlhého informačného kábla.

V prípade skúšok SP1 sa s ohľadom na neznámu orientáciu plechu k smeru valcovania sa 3 skúšobné tyče orientovali v smere rovnobežnom s pozdĺžnou stranou plechu a 3 skúšobné tyče v smere kolmom na pozdĺžnu stranu SP1, aby bolo možné namerané hodnoty porovnať. Skúška sa vykonala pri teplote $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ podľa STN EN ISO 148-1 [6].

V prípade skúšok OK - SM sa 3 skúšobné tyče vyrezali z dolnej pásnice dielca HL-H4 s hrúbkou 40 mm. Skúšobné tyče sa vyrezali tak, aby boli dlhšou stranou (55 mm) orientované v pozdĺžnom smere mosta (predpokladaný smer valcovania plechu) a vruby aby boli v smere kolmo na povrch plechu. Z pásnice sa vyrezali 3 skúšobné tyče, dve v blízkosti povrchov a jedna v strede hrúbky. Skúška sa vykonala pri teplote $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ podľa STN EN ISO 148-1.

V rámci skúšok SP2 sa vyrezali skúšobné tyče pre skúšku rázom v ohybe v smere kolmom na pozdĺžnu stranu styčnickového plechu, pričom 3 skúšobné tyče sa skúšali pri teplote $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 3 skúšobné tyče pri teplote $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Skúška tvrdosti

Skúška tvrdosti sa vykonala tvrdomerom značky HARDTECH 9000. Tvrdomer využíva odrazovú metódu merania tvrdosti, v rámci ktorej sa meria rozdiel dopadovej a odrazovej rýchlosti meracej sondy tvrdomeru. Meracia sonda tvaru valca s kalenou guľôčkou na čele sa v priebehu merania pohybuje vo vyleštenom valcovom tubuse, v ktorom je smerom k meranému povrchu „vystreľovaná“ valcovou pružinkou. Čím je rozdiel dopadovej a odrazovej rýchlosti menší, tým je materiál tvrdší. Presnosť merania negatívne ovplyvňujú nerovnosti na povrchu materiálu. Väčšie nerovnosti na povrchu materiálu sa ľahšie deformujú ako rovný povrch, preto spôsobujú väčší útlm kinetickej energie meracej sondy. Tým vytvárajú dojem nižšej tvrdosti (odrazová rýchlosť klesá a narastá rozdiel rýchlostí pred a po náraze na materiál). Preto bolo nevyhnutné v mieste merania povrch konštrukčných dielcov obrúsiť na kovový povrch a vyleštiť lamelovým kotúčom, aby sa dosiahla nízka drsnosť.

Meranie tvrdosti sa vykonalo na 8-ich miestach na povrchu OK - SM, kde sa pred tým vykonala chemická analýza prenosným analyzátorom. Na každom meracom mieste sa vykonali 3 merania, z ktorých tvrdomer vypočítal priemernú hodnotu. Z hodnôt tvrdosti sa neskôr odhadli⁴ hodnoty pevnosti ocele prepočtom podľa normy STN EN ISO 18265 [7].

Meranie hrúbky materiálov

Meranie hrúbok materiálov sa vykonalo ultrazvukovým hrúbkomerom Stress TL. Pri meraní hrúbky ultrazvukom sa využíva schopnosť kovových materiálov prenášať ultrazvukové (akustické) signály. Meracia sonda ultrazvukového hrúbkomeru (jej vysielacia časť) vysiela v pravidelných intervaloch akustické (ultrazvukové) impulzy, ktoré sa cez väzobné médium (obvykle vazelína) šíria do kovového materiálu. Na protiláhlej strane materiálu sa vlny odrážajú späť. Prijímacia časť ultrazvukovej sondy registruje návratový impulz. Ultrazvukový hrúbkomer meria čas medzi odoslaním a prijatím signálu, ktorý násobí známou rýchlosťou šírenia akustických vln v oceli ($5920\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), čím dostáva celkovú dráhu impulzu v materiáli. Polovica tejto hodnoty je meraná hrúbka materiálu. Pre zabezpečenie dostatočného prenosu ultrazvukového impulzu zo sondy do materiálu a späť do sondy je potrebné, aby sa povrch materiálu v mieste merania obrúsil až na kovový povrch a odstránili sa vrstvy materiálu

⁴ Presný prepočet hodnôt pevnosti z hodnôt tvrdosti nie je možný, preto sa jedná iba o odhad s určitou mierou spoľahlivosti.

brániace prechodu ultrazvukového impulzu (farba, hrdza, veľká drsnosť a pod.). Na protiláhlej strane meraného materiálu je potrebné zabezpečiť iba to, aby povrch nebol extrémne členitý, čo by mohlo pohltiť neúmerne veľkú časť impulzu a znemožniť meranie.

Meranie hrúbok sa vykonalo na 96-ich miestach OK – SM na skládke v Prešove, pričom sa pri výbere meracích miest rešpektovali priority vopred stanovené projektantom. Na každom meracom mieste sa vykonali minimálne 3 merania (max. 6 meraní), aby bolo možné namerané hodnoty považovať za dostatočne dôveryhodné, prípadne aby bolo možné inžiniersky posúdiť variabilitu (rozptyl) nameraných hodnôt hrúbky. Hrúbkomer sa v priebehu meraní priebežne kalibroval na priloženom etalóne.

4 Výsledky skúšok a meraní

Výsledky skúšok a meraní sú uvedené v prílohách k tejto technickej správe nasledovne:

- výsledky chemickej analýzy SP1, Protokol č. 147/16/CH, Príloha 1,
- výsledky chemickej analýzy OK – SM v Prešove, Protokoly č. 008 AM 2016 až 027 AM 2016, Prílohy 2 až 21,
- identifikačný kľúč k protokolom z chemickej analýzy, Príloha 22,
- výsledky chemickej analýzy spodnej pásnice dielca HL-H4 OK – SM, Protokol ZMV/2016/Z14/06/PR, Príloha 23,
- výsledky skúšky ťahom SP1, Protokol č. 490/16/MECH a 491/16/MECH, Prílohy 24 a 25,
- výsledky skúšky rázom v ohybe SP1, Protokol č. 490/16/MECH a 491/16/MECH, Prílohy 24 a 25,
- výsledky skúšky rázom v ohybe spodnej pásnice dielca HL-H4 OK – SM, Protokol č. 698/16/MECH, Príloha 26,
- výsledky skúšky rázom v ohybe SP2, Protokol č. 848/16/MECH a 879/16/MECH, Prílohy 27 a 28,
- výsledky merania tvrdosti OK – SM, Protokol ZMV/2016/Z14/08/PR, Príloha 29,
- výsledky merania hrúbky OK – SM, Protokol ZMV/2016/Z14/07/PR, Príloha 30,
- výkres OK – SM Staré mesto - namerané hrúbky prierezov, Príloha 31,
- výkres OK – SM Petržalka - namerané hrúbky prierezov, Príloha 32.

5 Vyhodnotenie výsledkov skúšok a meraní

Chemická analýza

Na základe výsledkov chemickej analýzy SP1 je možné konštatovať:

- chemické zloženie analyzovaného plechu vyhovuje požiadavkám ČSN 41 1375, ČSN 11 378 a ČSN 42 0002 na chemické zloženie ocele 11 375 aj ocele 11 378,

- analyzovaný plech má veľmi priaznivý (nízky) obsah uhlíka a ďalších prvkov, ktoré pri vyšších obsahoch spôsobujú transformačné skrehnutie ocele v priebehu jej zvárania (najmä Mn, Cr, Mo, Ni, Cu, V),
- hodnoty uhlíkových ekvivalentov CE_{IIV} aj CET sú priaznivo nízke,
- obsah síry a fosforu vyhovuje požiadavkám noriem na ocel 11 375 [1] aj 11 378 [2],
- obsah dusíka je nízky a v oceli je primerané množstvo hliníka, preto náchylnosť ocele na deformačné starnutie bude zanedbateľná.

Na základe výsledkov chemickej analýzy dielcov OK – SM (skládka Prešov) je možné konštatovať:

- chemické zloženie všetkých kontrolovaných dielcov OK – SM vyhovuje požiadavkám noriem ČSN 41 1375 (ocel 11 375) a ČSN 41 1378 na chemické zloženie ocelí 11 375 a 11 378,
- vo všetkých kontrolovaných dielcoch OK – SM je nízky obsah uhlíka aj nízka hodnota uhlíkového ekvivalentu, čo signalizuje nízku náchylnosť kontrolovaných materiálov na transformačné skrehnutie v priebehu zvárania,
- obsah nečistôt (síra, fosfor) v kontrolovaných dielcoch je nízky alebo na prijateľných hodnotách,
- obsah nežiadúcich ťažkých kovov a povrchovo aktívnych prvkov (Pb, Sn, As) je uspokojivo nízky, vyšší je obsah bizmutu, čo by mohlo naznačovať určité zhoršenie plastických vlastností,
- väčšina kontrolovaných dielcov obsahuje dostatočné množstvo hliníka na potlačenie náchylnosti ocele na starnutie, naopak, nedostatočný obsah hliníka sa zistil v analýzach č. 014, 015, 020, 021, 022, 023, 026 a 027, v týchto prípadoch nie je možné vylúčiť riziko starnutia ocele po ich technologickom ohreve na 600 °C a vyššie (napr. v priebehu zvárania).

Na základe chemickej analýzy plechu hrúbky 40 mm (spodná pásnica dielca HL-H4) je možné konštatovať nízky obsah dusíka, čo znižuje riziko starnutia ocele.

Skúšky ťahom

Na základe výsledkov skúšok ťahom skúšobných tyčí vyrobených z SP1 (Tab. 1) je možné konštatovať:

- pevnostné charakteristiky R_e a R_m namerané pri skúške ťahom v oboch smeroch skúšaných smeroch spĺňajú požiadavky ČSN 41 1375 aj ČSN 41 1378 na pevnostné charakteristiky hrubých plechov,
- namerané hodnoty R_e sa pohybujú v intervale 252 až 296 MPa, čo je možné považovať za obvyklú mieru variability pre túto skupinu materiálov,
- namerané hodnoty R_e sú vyššie o 27 až 61 MPa (11 375) resp. o 37 až 71 MPa (11 378), než je požadovaná minimálna hodnota R_e , čo v minulosti nebolo pre túto skupinu materiálov neobvyklé.
- namerané hodnoty R_m sa pohybujú v intervale 415 až 424 MPa, čo je možné považovať za veľmi dobrú (úzku) mieru variability pre túto skupinu materiálov,

- namerané hodnoty ťažnosti A_5 s dostatočnou rezervou spĺňajú požiadavky ČSN 41 1375 aj ČSN 41 1378, mierny pokles ťažnosti v smere rovnobežnom oproti kolmému smeru k dlhšej strane styčniskového plechu je z hľadiska použiteľnosti materiálu nepodstatný, ale naznačuje, že smer valcovania bol pravdepodobne kolmý na dlhšiu stranu styčniskového plechu,
- namerané hodnoty ťažnosti A_5 vyhovujú aj súčasným požiadavkám na ťažnosť za tepla valcovaných plechov vyrobených z ocele porovnateľnej akostnej triedy (napr. S235 JR podľa EN 10025-2 [5]).

Skúšky rázom v ohybe

Na základe výsledkov skúšok rázom v ohybe skúšobných tyčí vyrobených z SP1 (Tab. 1) je možné konštatovať:

- namerané hodnoty nárazovej práce pri teplote -30 °C sú veľmi nízke v oboch smeroch; aj v tomto prípade sa javí, že smer valcovania pôvodného plechu, z ktorého bol (styčniskový) plech vyrobený bol kolmý na pozdĺžnu stranu (styčniskového) plechu,
- hrubé plechy z ocele 11 375 majú podľa ČSN 41 1375 špecifikované požiadavky na nárazovú prácu iba pri teplote $+20\text{ °C}$, preto nie je možné výsledky skúšok vykonaných na SP1 pri teplote -30 °C porovnávať s pôvodnými požiadavkami ČSN 41 1375,
- hrubé plechy z ocele 11 378 majú podľa ČSN 41 1378 špecifikované požiadavky na nárazovú prácu pri teplote -20 °C , namerané nízke hodnoty nárazovej práce pri teplote -30 °C naznačujú, že (styčniskový) plech nebol vyrobený z ocele 11 378.

Na základe výsledkov skúšok rázom v ohybe skúšobných tyčí vyrobených z SP2 (Tab. 1) je možné konštatovať:

- namerané hodnoty nárazovej práce pri teplote $+20\text{ °C}$ vyhovujú požiadavkám noriem ČSN 41 1375 aj ČSN 41 1378 (minimálne 27 J pri teplote $+20\text{ °C}$),
- namerané hodnoty nárazovej práce pri teplote -20 °C sú výrazne nižšie, ako pri teplote $+20\text{ °C}$ a nevyhovujú požiadavkám normy ČSN 41 1378 (minimálne 27 J pri teplote -20 °C),
- nízke hodnoty nárazovej práce SP2 pri teplote -20 °C potvrdzujú predpoklad zo skúšok SP1, že styčniskové plechy sú vyrobené z ocele 11 375, pre ktorú nie sú požadované záruky nárazovej práce pri teplote -20 °C .

Na základe výsledkov skúšky rázom v ohybe skúšobných tyčí vyrezaných zo spodnej pásnice dielca HL-H4 (OK-SM, Tab. 1), je možné konštatovať, že nárazová práca ocelového plechu dolnej pásnice dielca HL-H4 pri teplote $+20\text{ °C}$ je výrazne vyššia (cca 5 x), než požaduje norma [1] pre oceľ 11 375. Na základe týchto výsledkov je možné urobiť záver, že plech dolnej pásnice bol vyrobený z ocele 11 378.

Skúšky tvrdosti

Na základe výsledkov meraní tvrdosti dielcov OK – SM je možné konštatovať, že pevnostné charakteristiky (R_e , R_m) meraných plechov spĺňajú požiadavky ČSN 41 1375 aj ČSN 41 1378 na pevnostné charakteristiky hrubých plechov vyrobených z ocelí 11 375 a 11 378, resp. sú vyššie.

Meranie hrúbky

Na základe výsledkov meraní hrúbky OK – SM je možné konštatovať, že materiály sú napadnuté koróziou a úbytok hrúbky bude potrebné zohľadniť pri návrhu konštrukcie.

6 Súhrnné hodnotenie skúšaných materiálov

1. Materiálová zvariteľnosť skúšaných materiálov je vyhovujúca. Tento názor podporuje aj skutočnosť, že pôvodná konštrukcie OK – SM bola vyrobená ako prevažne zvaraná konštrukcia.
2. Pevnostné charakteristiky skúšaných materiálov vyhoveli požiadavkám noriem ČSN 41 1375 aj ČSN 41 1378.
3. Hodnota nárazovej práce plechu spodnej pásnice dielca HL-H4 pri teplote +20 °C vysoko prekročila požiadavky normy ČSN 41 1375, čo naznačuje, plech bol vyrobený z ocele 11 378.
4. Styčnikové plechy sú pravdepodobne vyrobené z ocele 11 375 (t.j. nie z ocele 11 378) a ich hodnoty nárazovej práce pri teplote -30 °C resp. -20 °C sú nízke.
5. Konštrukčné prvky OK – SM sú výrazne napadnuté koróziou, čo bude potrebné zohľadniť pri pevnostnom návrhu mostov.

Vykonané skúšky sú iba výberové skúšky, ktoré pochopiteľne nemohli pokryť všetky materiály na OK – SM. Napriek tomu, vyhovujúce výsledky skúšok spolu s doterajším úspešným použitím týchto materiálov na oceľovej konštrukcii Starého mosta cez Dunaj v Bratislave po dobu približne 35-ich rokov prevádzky sú predpokladom pre ich úspešné použitie na mostoch Kladzany a Ondava.

Problém, ktorý sa objavil v prípade skúšaných materiálov sú relatívne nízke hodnoty nárazovej práce styčnikových plechov pri teplotách -30 °C resp. -20 °C. Požiadavky na húževnatosť konštrukčných materiálov rieši norma EN 1993-1-10 [8] sa v prípade slovenskej verzie tejto normy Národná príloha k STN EN 1993-1-10 [9].

EN 1993-1-10 definuje tzv. prístup najväčšej hrúbky⁵, ktorý dáva do súvisu referenčnú teplotu (najnižšiu návrhovú teplotu), medzu klzu ocele, úroveň mechanického napätia v posudzovanom priereze (dielci) a skúšobnú teplotu, pri ktorej materiál dosiahol nárazovú prácu minimálne 27 J. V prípade styčnikových plechov to pre referenčnú teplotu OK mostov Kladzany a Ondava -30 °C znamená maximálne hrúbky styčnikových plechov $t = 30$ mm pre $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y$, $t = 45$ mm pre $\sigma_{Ed} = 0,50 f_y$ a $t = 75$ mm pre $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y$, pozri [8].

⁵ EN 1993-1-10 špecifikuje aj prístup vyhodnotenia s použitím lomovej mechaniky. Použitie tohto prístupu si vyžaduje znalosť hodnôt lomovej húževnatosti materiálu, ktoré nie sú k dispozícii.

Prístup najväčších prípustných hrúbok definuje podobne aj k Národná príloha k STN EN 1993-1-10. Z Tabuľky NB.4 (statické namáhanie a závažné dôsledky porušenia konštrukcie C2) vyplývajú pre oceľ S235 JR (zodpovedá oceli 11 375 styčnickových plechov), minimálnu návrhovú teplotu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nezvárané prvky maximálna hrúbka 33 mm, pozri [9].

Z uvedeného vyplýva, že napriek nízkym hodnotám nárazovej práce nameranej na styčnickových plechoch tieto vyhovujú požiadavkám prístupu najväčšej hrúbky podľa EN 1993-1-10 resp. podľa Národnej prílohy k STN EN 1993-1-10 do hrúbok približne 30 mm. V prípade najviac namáhaných styčnickových plechov (ťahovým napätím) v kritických miestach konštrukcie mostov je možné napriek uvedenému zvážiť ich výmenu za materiál s húževnatosťou pri teplotách $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozhodnutie o ich výmene je nazvážení projektanta v závislosti od predpokladanej úrovne napätí a charakteru zaťaženia.

V prípade konštrukčných prvkov vlastnej konštrukcie sa situácia, s ohľadom na namerané hodnoty nárazovej práce plechu spodnej pásnice dielca HL-H4, javí priaznivejšia. S ohľadom na to, že je k dispozícii iba výsledok jednej skúšky, bude vhodné zvážiť vykonanie ďalších skúšok rázom v ohybe na niekoľkých náhodne vybraných častiach konštrukcie. Pri tom je potrebné zobrať do úvahy skutočnosť, že pri rovnakej úrovni zaťaženia sú konštrukčné prvky s väčšou hrúbkou náchylnejšie na vznik krehkého porušenia, ako konštrukčné prvky s menšou hrúbkou. Preto má zmysel skúšať iba materiály s hrúbkou väčšou ako 15 resp. 20 mm, nie menšou.

Chemická analýza materiálu niektorých konštrukčných prvkov OK – SM ukázala nižší alebo chýbajúci obsah hliníka, ktorý účinne viaže dusík v oceli. V týchto prípadoch preto nie je možné vylúčiť prípadné riziko náchylnosti týchto ocelí na stárnutie v teplom ovplyvnenej oblasti zvarových spojov napriek inak dostatočnému obsahu kremíka. Preto bude vhodné v prípade kritických zvarových spojov žiadať od výrobcu, aby preukázal náchylnosť zvarovaných materiálov na stárnutie a v prípade potreby aby aplikoval vhodné technologické opatrenia ako dohrev pri vyšších teplotách prípadne žiňanie na zníženie zvyškových napätí.

7 Záver

Vykonané skúšky preukázali vyhovujúcu zvariteľnosť, pevnostné vlastnosti a rázovú húževnatosť skúšaných materiálov. Húževnatosť styčnickových plechov pri nízkych teplotách je výrazne nižšia. S ohľadom na to, že v styčnickových plechoch nie sú zvyškové napätia (nie sú zvárané), je v zmysle EN 1993-1-10 možné ich použitie do hrúbok max. cca 30 mm. Materiály konštrukcie sú miestami výrazne poškodené koróziou, čo bude potrebné zohľadniť pri pevnostnom návrhu konštrukcie.

8 Literatúra

- [1] ČSN 41 1375: 1976 Ocel 11 375
- [2] ČSN 41 1378: 1994 Ocel 11 378
- [3] ČSN 42 0002: 1976 Číselné označování a a rozdělení ocelí ke tváření
- [4] Šmíd, V. a kol. Dílčí zpráva státního výzkumného úkolu P-06-123-203-01 „Omezení a unifikace stávajících jakostí svařitelných konstrukčních ocelí“, VÚHŽ Dobruška, 1978
- [5] STN EN ISO 6892-1:2010 Kovové materiály. Skúška ťahom. Časť 1: Skúška ťahom pri teplote okolia
- [6] STN EN ISO 148-1:2009 Kovové materiály. Skúška rázovej húževnatosti podľa Charpyho. Časť 1: Skúšobné metódy.
- [7] STN EN ISO 18265:2004 Kovové materiály – Prevod hodnôt tvrdosti.
- [8] EN 1993-1-10:2006 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties
- [9] STN EN 1993-1-10:2007 Eurokód 3. Navrhovanie ocelových konštrukcií. Časť 1-10: Húževnatosť materiálu a vlastnosti v smere hrúbky. Národná príloha.

Tabuľka 1

Zdroj informácií	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)	KV (J)
požiadavka ČSN 41 1375 pre hrubé plechy (3 ≤ t ≤ 40 mm) z ocele 11 375.1 alebo 11 375.1	≥ 235	363 ÷ 441	≥ 22 ¹⁾	27 pri +20 °C ²⁾
požiadavka ČSN 41 1378 pre hrubé plechy (3 ≤ t ≤ 16 mm) z ocele 11 378.0 alebo 11 378.1	≥ 235	340 ÷ 470	≥ 24 ¹⁾	27 pri 0 °C ²⁾ 27 pri -20 °C ²⁾³⁾
požiadavka ČSN 41 1378 pre hrubé plechy (16 ≤ t ≤ 40 mm) z ocele 11 378.0 alebo 11 378.1	≥ 225	340 ÷ 470	≥ 24 ¹⁾	27 pri 0 °C ²⁾ 27 pri -20 °C ²⁾³⁾
výsledky skúšok SP1, skúšobné tyče rovnobežné s pozdĺžnou stranou plechu, protokol č. 490/16/MECH (Príloha 24)	255	415	31,1	7; 8; 8
	296	415	26,6	pri -30 °C
výsledky skúšok SP1, skúšobné tyče kolmé na pozdĺžnu stranu plechu, protokol č. 491/16/MECH (Príloha 25)	291	419	34,8	8; 8; 11
	252	424	30,5	pri -30 °C
výsledky skúšok dielca HL-H4 (Príloha 26)				129; 156; 125 pri +20 °C
výsledky skúšok SP2, skúšobné tyče kolmé na pozdĺžnu stranu plechu, protokol č. 848/16/MECH (Príloha 27)				52; 46; 42 pri +20 °C
výsledky skúšok SP2, skúšobné tyče kolmé na pozdĺžnu stranu plechu, protokol č. 879/16/MECH (Príloha 28)				12; 14; 11 pri -20 °C

Poznámky:

¹⁾ skúšobné tyče v smere kolmom na smer valcovania pri teplote +20 °C

²⁾ skúšobné tyče v smere rovnobežnom so smerom valcovania

³⁾ Hodnoty nárazovej práce KV pri teplote -20 °C sa vzťahujú iba k stavu normalizačne žíhanému.

Tabuľka 2

Materiál	Obsah prvkov (%)															
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Ti	V	Al	N	Ce ³⁾	CET ⁴⁾
11 375 podľa ČSN 41 1375	≤0,20	-	-	≤0,055	≤0,055	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11 378 podľa ČSN 41 1378	≤0,17	-	-	≤0,040	≤0,040	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,009	-	-
¹⁾	-	≤0,90	≤0,50	-	-	≤0,30	≤0,50	≤0,10	≤0,07	≤0,10	≤0,10	≤0,10	≤0,10	-	-	-
styčnickový plech, výsledok analýzy ²⁾	0,13	0,43	0,20	0,032	0,018	0,082	0,041	<0,01	0,08	<0,003	<0,003	0,007	0,037	0,0038	0,227	0,182

Poznámky:

¹⁾ Požiadavky ČSN 42 0002 pre medzne obsahy prvkov nelegovaných ocelí

²⁾ Výsledky z chemickej analýzy uvedené v protokole č. 147/16/Ch, (Príloha 3)

³⁾ Uhlíkový ekvivalent IIW: $Ce = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$

⁴⁾ Uhlíkový ekvivalent CET podľa EN 1011-2: $CET = c + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$