Související odkazy:

- Nařízení REACH je k dispozici na www.cenia.cz v sekci REACH – Legislativa REACH.
- Stránky Národního informačního centra REACH: www.cenia.cz/reach.
- „Formulář" pro zadávání dotazů prostřednictvím Help-Desku REACH: http://www.cenia.cz/helpdeskreach.
- Stránky Evropské agentury pro chemické látky: http://echa.europa.eu.
- Informace o registraci jsou v dispozici v pokynu „Guidance on registration", který je spolu s dalšími pokyny (Guidance) dostupný na adrese: http://guidance.echa.europa.eu/guidance_en.htm.
- Nařízení CLP je k dispozici na www.cenia.cz v sekci CLP – Legislativa CLP.
- Stránky Národního informačního centra CLP: www.cenia.cz/clp.
- „Formulář" pro zadávání dotazů prostřednictvím Help-Desku CLP je k dispozici na www.cenia.cz v sekci CLP – Help-Desk CLP.
- Informace k CLP jsou v dispozici v pokynu „Introductory Guidance on the CLP Regulation", který je dostupný na adrese: http://guidance.echa.europa.eu.

Jan Kolář,
CENIA – Česká informační agentura životního prostředí, Czech Republic

Žárové zinkování jako termický proces

Systém protikorozní ochrany ocelových konstrukcí a výrobků žárovým zinkováním je pro své nesporné přednosti ve světě nejběžnějším protikorozním systémem aplikovaným na ocel. Vyznačuje se však určitými specifickými nároky kladenými na navrhování a provádění součástí určených k pokovení i na vlastní proces pozinkování. Tyto aspekty musí být pro úspěšné pozinkování bezpodmínečně a důsledně zohledněny.

Případy havárií u žárově pozinkovaných ocelových stavebních dílců, ke kterým v minulosti došlo z důvodu narušení jejich statické únosnosti, se staly podnětem pro zkoumání vlivu povrchové úpravy provedené žárovým zinkováním na konečné vlastnosti oceli a potažmo stavebních dílců z oceli vyrobených.

PŘÍČINY PORUŠENÍ CELISTVOSTI MATERIÁLU

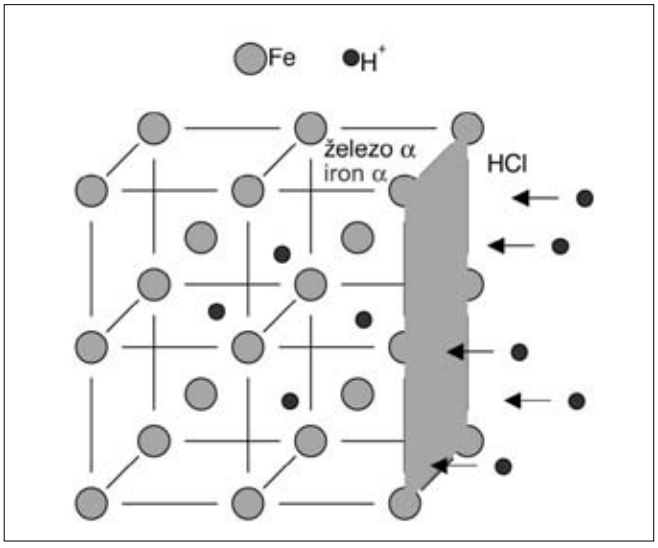
V souvislosti s problematikou zaznamenaných případů selhání nosných stavebních dílců žárově pozinkovaných ocelových konstrukcí je nutno respektovat skutečnost, že ocelová součást je při žárovém zinkovaní vystavena působení celé řady faktorů, které je možno rozdělit do tří základních oblastí:

1. Změny mechanických vlastností materiálu
2. Termika procesu pokovení
3. Působení roztaveného kovu

1. ZMĚNY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Vlastnosti oceli jsou významně ovlivněny způsobem jejího mechanického i tepelného zpracování a do značné míry i postupem chemické předúpravy před nanesením povlaku.

Vodíkové puchýře



Princip navodíkování povrchu feritické oceli

1.1. Vodíková křehkost

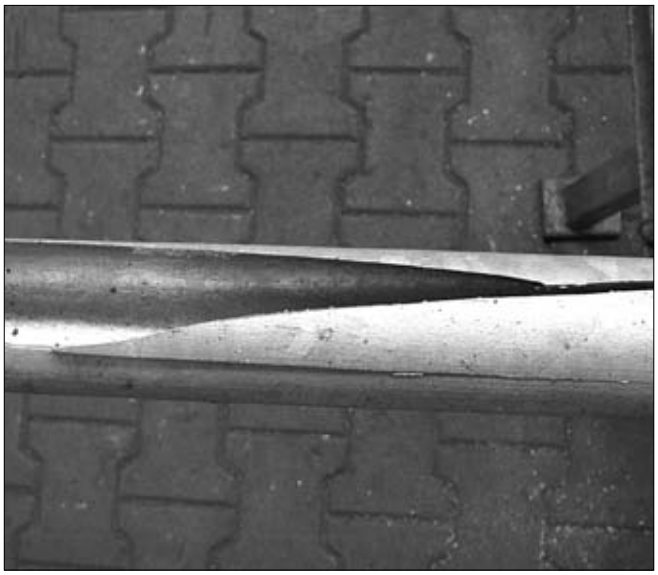
Součásti jsou před nanesením kovového povlaku mořeny, obvykle v kyselině solné, a při tom do povrchu oceli difunduje vodík, který u konstrukčních ocelí může způsobit vodíkovou křehkost materiálu. Princip vzniku tohoto jevu spočívá v tom, že vodík ve stavu zrodu uvolňovaný při reakci kyseliny s mořeným materiálem snadno intersticiálně vniká do krystalové mřížky feritu. Zde se váže buď do molekul vodíku, nebo v horším případě reaguje s uhlíkem. Molekuly vodíku které mají větší objem než jeho jednotlivé atomy, nejsou již schopny snadno difundovat ven, tvoří dutiny a silně narušují strukturu oceli. Slučuje-li se vodík s uhlíkem obsaženým v cementitu, váže se na velmi rozměrné molekuly metanu za současného ochuzování oceli o uhlík. To má za následek snižování pevnosti základního materiálu a vznik necelistvostí. Únosnost takto postiženého materiálu výrazně klesá. Nicméně vodíková křehkost způsobená při moření dodatečným navodíkováním povrchové vrstvy materiálu hraje v celé problematice praskání relativně podřadnou roli, neboť pro praskání představuje skutečné nebezpečí především vodík uzavřený v oceli v průběhu jejího odlévání.

Z hlediska rizika vzniku trhlin v důsledku žárového zinkování ocelových dílců je fenoménu vodíkové křehkosti obvykle připisována významnější role, než tomu tak ve skutečnosti je. Tvrzení,

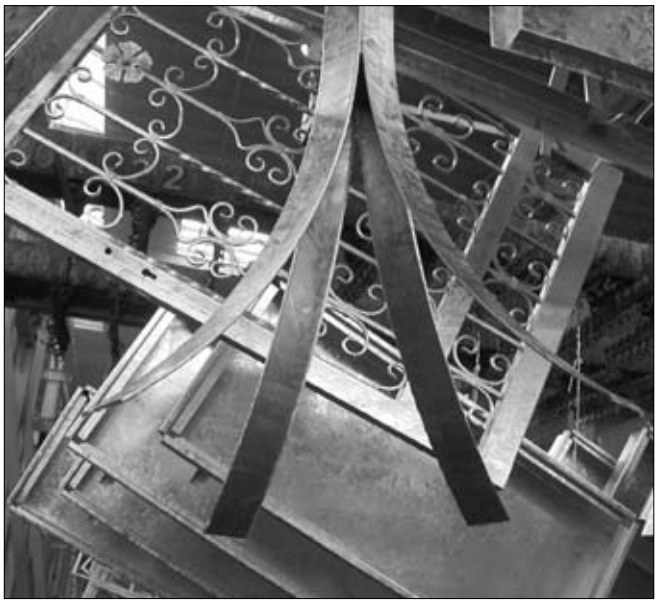
že oceli vyšších pevnostních tříd jsou k vodíkové křehkosti náchylnější než oceli nižších pevnostních tříd, se z velké části opírá o empirické zkušenosti z praxe. Z analýzy podmínek, za kterých k poruchám došlo, zle vysledovat že oceli s vyšší mezí kluzu ke vzniku trhlin více náchylné skutečně jsou. Obecně je proto přijímán názor, že k vodíkové křehkosti jsou takové oceli více náchylné. V této souvislosti je však nutno akceptovat fakt, že oceli s vyšší mezí kluzu jsou termickým procesem namáhány více, než oceli nižších jakostních tříd, jak vyplývá z analýzy provedené v kapitole 2. tohoto příspěvku. Vyšší mez kluzu materiálu zákonitě vede k vyšším hodnotám vnitřního pnutí součásti vystavené nerovnoměrnému ohřevu při postupném ponořování do zinkové taveniny, a tedy k jejímu většímu namáhání.

1.2. Popouštěcí křehkost

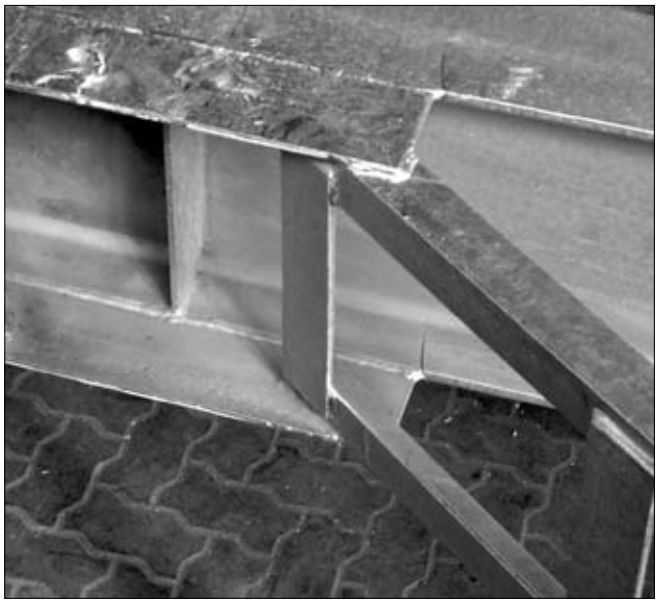
K popouštěcí křehkosti jsou náchylné zejména austenitické oceli. Takové materiály se v zakázkách pro žárová pozinkování vyskytují pouze zřídka, neboť se zpravidla jedná slitinové zušlechtitelné nebo korozivzdorné oceli a do výrobku určeného k pozinkování byly použity omylem. Právě teplota blízká teplotě zinkové taveniny 450 °C vede k výraznému snížení houževnatosti těchto ocelí



Popouštěcí křehkost



Zkřehnutí v důsledku tváření za studena



Trhliny na tuhé příhradové konstrukci

a v důsledku toho dojde k jejich spontánnímu rozpadnutí. Trhliny jsou v takových případech orientovány rovnoběžně se směrem textury materiálu.

1.3. Křehkost oceli tvářené za studena

Tváření za studena vede k deformačnímu zpevnění kovu a k výraznému zhrubnutí zrna ve struktuře oceli. U takto zpracovaných součástí je zapotřebí do pracovního procesu zařadit rekrystalizační žíhání, aby se materiál zotavil a obnovily se jeho původní mechanické vlastnosti. Zanedbání této důležité operace vede mnohdy při žárovém zinkování takto postižených součástí k jejich spontánnímu lomu.

2. TERMIKA PROCESU POKOVENÍ

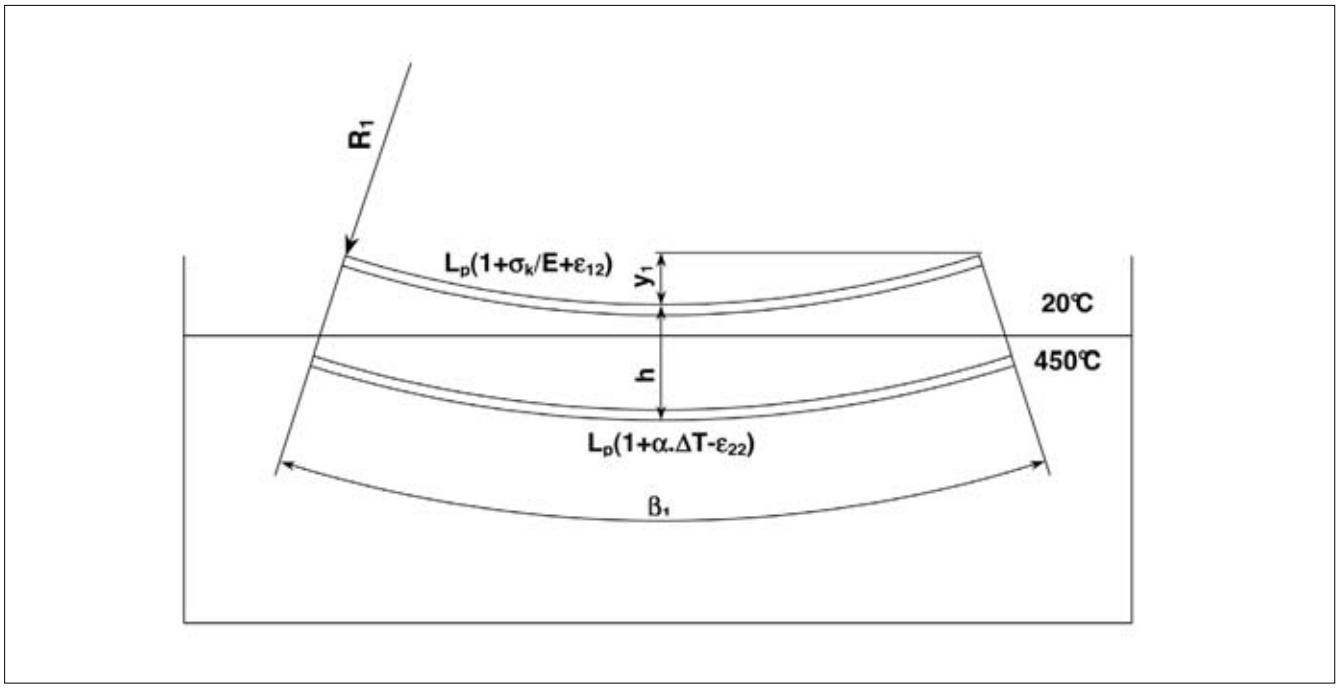
2.1. Nerovnoměrný ohřev

V průběhu ponořování zinkované součásti do zinkové taveniny o teplotě cca 450 °C dochází k jejímu nerovnoměrnému ohřevu, který v materiálu vyvolává pnutí. Při rozdílu teplot 430 °C mezi relativně chladnou části zinkovaného dílu nad hladinou a prohřátou částí pod hladinou překračuje napětí v krajních vláknech mez kluzu běžných konstrukčních ocelí a součásti se plasticky deformují. Takto vyvolaná přetvoření součásti omezí hodnoty napětí v materiálu na hodnoty blízké mezi kluzu, materiál určitým způsobem relaxuje a výrobek mění tvar. Pokud je součást konstrukčně řešena jako velmi tuhá bez možnosti volného rozpínání, napětí v materiálu se může přiblížit k limitní hodnotě 1083,6 MPa, která vyplývá z rozdílu teplot 430 °C a součinitele tepelné roztažnosti oceli. Po překročení meze pevnosti nastává lom. Při tom je nutno přihlédnout k faktu, že tažnost i únosnost oceli vystavené působení zvýšených teplot významně klesá oproti hodnotám za běžných teplot okolí a mění se i modul pružnosti. Při teplotách nad 400 °C přestává být u běžných konstrukčních ocelí patrná mez kluzu.

2.2. Analýza tvarových změn při ponořování

Děje doprovázející proces ponořování zinkované součásti do zinkové taveniny je možno demonstrovat na příkladu nosníku z profilu IPE, který je částečně ponořený do zinkovací lázně v celé své délce, a to pouze do poloviny výšky profilu. Podobné poměry doprovázejí žárové zinkování příhradových konstrukcí.

Je-li nosník délky L_p do poloviny výšky h profilu ponořen do zinkové taveniny, spodní pásnice se ohřeje na teplotu lázně, přičemž má snahu prodloužit se na délku



Deformace nosníku od působení teploty zinkové lázně

$$L = L_p.(1+\alpha.\Delta T) \quad (1),$$

kde je

$$\alpha = 12.10^{-6}\ K^{-1}$$

hodnota součinitele tepelné roztažnosti oceli a

$$\Delta T = 430\ K$$

rozdíl teplot mezi horní a spodní pásnicí nosníku.

Ohřev spodní pásnice v ní vyvolá osovou sílu F, která je součinem plochy průřezu pásnice a napětí vyvolaného tepelnou roztažností materiálu. Tato síla působí na horní chladnou pásnici a způsobí její prodloužení na délku

$$L_1 = L_p + \Delta L_1 \quad (2).$$

Mezní hodnota tahového napětí v horní chladné pásnici nebo tlakového napětí ve spodní ohřáté pásnici vyplývá z velikosti poměrného prodloužení působením teploty lázně na spodní pásnici profilu a pro dokonale tuhý materiál by byla

$$\sigma_{max} = E.\alpha.\Delta T = 1\ 086{,}3\ MPa \quad (3),$$

Tato hodnota překračuje mez kluzu běžně zinkované konstrukční oceli, proto se zinkovaná součást deformuje i plasticky. Celková poměrná deformace horní chladné pásnice je složena z poměrné elastické deformace a poměrné plastické deformace:

$$\varepsilon_1 = \Delta L_1/L_p = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} \quad (4),$$

kde poměrná elastická deformace vyplývá z Hookova zákona a je

$$\varepsilon_{11} = \sigma_k/E \quad (5).$$

Poměrná plastická deformace horní chladné pásnice ε_{12} závisí na velikosti i rychlosti napěchování spodní teplé pásnice, které lze vyjádřit pomocí poměrné plastické deformace ε_{22} spodní pásnice.

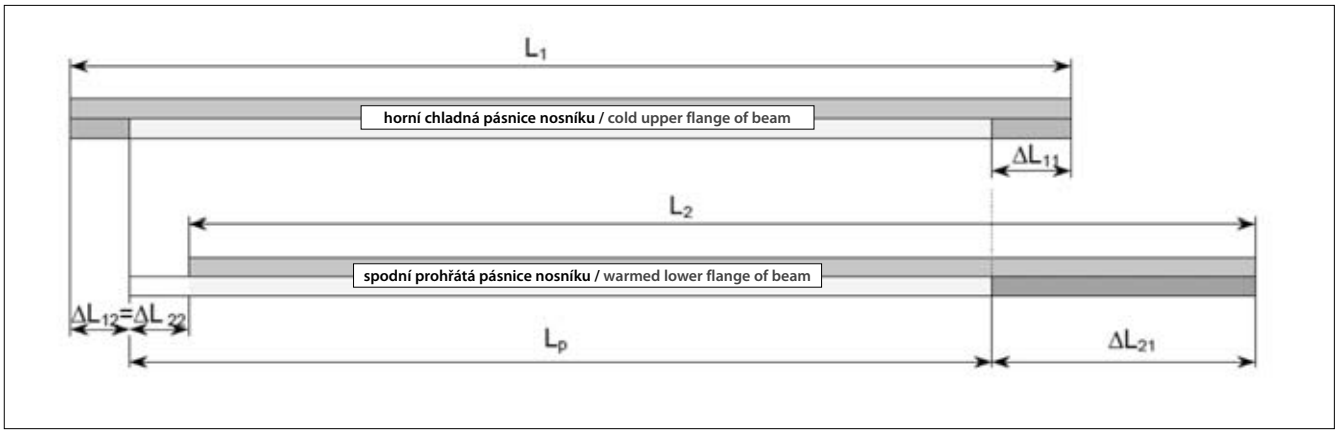
Vzhledem k tomu, že u konstrukční oceli při teplotách nad 400 °C není prakticky zjistitelná mez kluzu, je napěchování spodní pásnice nosníku, která je prohřátá na teplotu zinkové taveniny cca 450 °C, plastickou deformací a zároveň platí, že tato poměrná plastická deformace ε_{22} není menší než poměrná plastická deformace horní chladné pásnice:

$$|\varepsilon_{12} / \varepsilon_{22}| < 1 \quad (6).$$

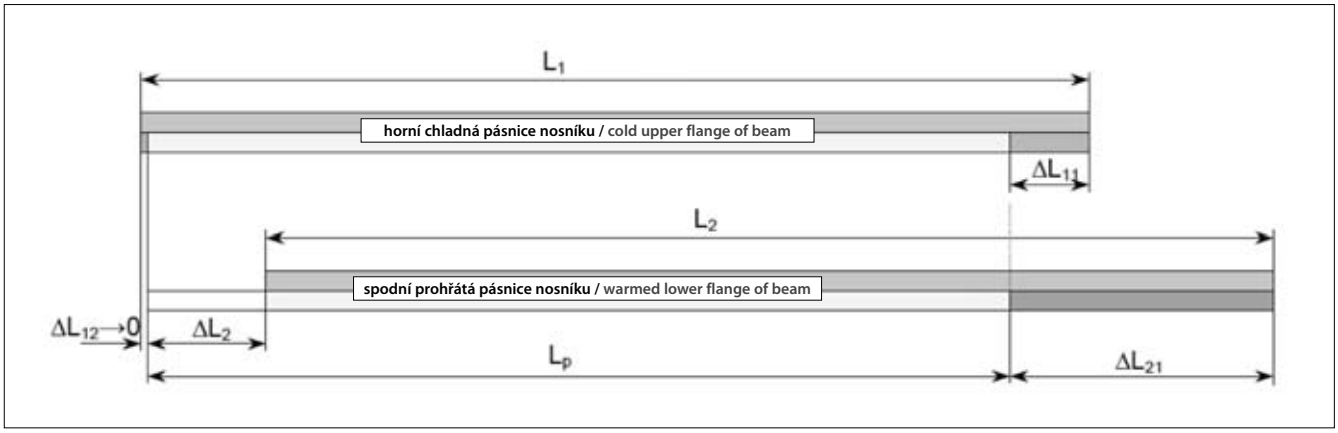
Na geometrii segmentu nosníku prohnutého působením teploty zinkové lázně má poměr mezi oběma plastickými deformacemi zanedbatelný vliv a pro zjednodušení je možno uvažovat stav, kdy se horní chladná pásnice nosníku deformuje pouze elasticky a celá plastická deformace nosníku spočívá v napěchování spodní ohřáté pásnice nosníku. V tom případě platí, že $\varepsilon_{12} \rightarrow 0$ a hodnota poměrné plastické deformace ε_{22} může nabývat hodnot reálných čísel v intervalu $\varepsilon_{22} \in (0;\ \alpha.\Delta T - \sigma_k/E)$. První z extrémů představuje situaci, kdy se obě pásnice deformují pouze elasticky a poloměr zakřivení segmentu nabývá maxima, v případě druhého extrému by byly celkové deformace obou pásnic stejné (spodní prohřátá pásnice by se napěchovala na délku horní relativně chladné pásnice prodloužené o $L_p.\sigma_k/E$ a nosník by se neprohnul. Žádný z obou extrémů v praxi nenastane, avšak takto vymezený interval významně omezuje pravděpodobné stavy. Skutečná hodnota poměrné plastické deformace ε_{22} leží uvnitř relativně malého intervalu. Vzhledem k tomu, že výslednou geometrii segmentu významně ovlivňují dynamika procesu ponořování a změny materiálových charakteristik při působení zvýšených teplot, je nutno předpokládat určitý rozptyl výsledků.

Následující ilustrace názorně ukazují, že na výslednou geometrii segmentu má zanedbatelný vliv, zda plastická deformace zasáhne obě pásnice nosníku, nebo je plasticky deformována pouze spodní prohřátá, a tedy poddajnější pásnice. Obrázky ukazují, jak se změní délky obou pásnic v případě, že:

a) velikost plastické deformace (prodloužení) horní chladné pásnice je v extrémním případě rovna velikosti plastické deformace (napěchování) spodní prohřáté pásnice nosníku ($\varepsilon_{12} = \varepsilon_{22}$);



a) Grafické znázornění deformací obou pásnic nosníku o výchozí délce L_p vlivem nerovnoměrného ohřevu nosníku při rovnoměrném rozložení plastické deformace do obou pásnic.



b) Grafické znázornění deformací obou pásnic nosníku o výchozí délce L_p vlivem nerovnoměrného ohřevu nosníku při plastické deformaci pouze u spodní pásnice.

b) veškerá plastická deformace se v opačném extrému projeví ve zkrácení (napěchování) spodní prohřáté pásnice nosníku ($\varepsilon_{12} \rightarrow 0$).

Z této grafiky vyplývá, že poměr mezi ε_{21} a ε_{22} nemá významný vliv na geometrii segmentu, neboť reálné hodnoty obou těchto poměrných deformací jsou velmi malé ($|\varepsilon_{22}| \ll 1$). Celková poměrná deformace spodní prohřáté pásnice je rovna rozdílu mezi poměrným prodloužením ε_{21} vyvolaným tepelnou roztažností materiálu a poměrným plastickým zkrácením ε_{22} způsobeným napěchováním materiálu

$$\varepsilon_2 = \Delta L_2 / L_p = \varepsilon_{21} - \varepsilon_{22} \quad (7),$$

kde ε_{21} je poměrné prodloužení spodní pásnice způsobené tepelnou roztažností materiálu

$$\varepsilon_{21} = \alpha . \Delta T \quad (8).$$

Poměrné plastické zkrácení ε_{22} má neznámou velikost, přičemž jeho hodnota významně ovlivňuje velikost průhybu segmentu a tomu odpovídající hodnotu napětí ve stojině nosníku.

Jestliže se horní chladná pásnice prodlouží o

$$\Delta L_1 = \sigma_k / E \quad (9)$$

a spodní prohřátá pásnice se prodlouží o

$$\Delta L_2 = L_p . (\alpha . \Delta T - \varepsilon_{22}) \quad (10)$$

pak vzniklý segment má délky oblouků na pásnicích

$$L_1 = L_p + L_p . \varepsilon_1 = L_p . (1 + \sigma_k / E) \quad (11),$$

$$L_2 = L_p + L_p . \varepsilon_2 = L_p . (1 + \alpha . \Delta T - \varepsilon_{22}) \quad (12).$$

Se zanedbatelnou chybou je možno tvar zakřivení segmentu na horní chladné pásnici pro další rozbor nahradit kruhovým obloukem o poloměru R_1, s výškou kruhové úseče y_1, délkou tětivy I_t a úhlem β_1 mezi krajními radiálami segmentu. Pak platí

$$I_t = 2\sqrt{y_1 (2R_1 - y_1)}$$

a současně

$$I_t = 2 . R_1 . \sin(\beta_1 / 2) \quad (14).$$

Pro poloměr zakřivení R_1 z (13) a (14) vyplývá kvadratická rovnice

$$\sin^2(\beta_1/2) . R_1^2 - 2 y_1 . R_1 + y_1^2 = 0 \quad (15),$$

jejímž řešením je

$$R_1 = \frac{y_1 \cdot \left[1 \pm \sqrt{1 - \sin^2(\beta_1/2)}\right]}{\sin^2(\beta_1/2)} \quad (16)$$

Zde má praktický význam znaménko + před odmocninou.

Při $\varepsilon_{12} \rightarrow 0$ pak pro poloměr zakřivení segmentu současně platí

$$R_1 = L_p.(1+\sigma_k/E)/\beta_1 \quad (17)$$

$$R_1+h = L_2/\beta_1 = L_p.(1+\alpha.\Delta T-\varepsilon_{22})/\beta_1 \quad (18).$$

Dosazení (17) do (15) vede k implicitnímu vztahu vyjadřujícímu při dané výchozí délce nosníku L_p závislost velikosti úhlu β_1 mezi krajními radiálami segmentu na velikosti průhybu nosníku y_1:

$$\sin^2(\beta_1/2).[L_p.(1+\sigma_k/E)/\beta_1]^2-$$

$$-2y_1.L_p.(1+\sigma_k/E)/\beta_1 + y_1^2 = 0 \quad (19).$$

Obor reálných hodnot průhybu y_1 a úhlu β_1 mezi krajními radiálami segmentu se snadno omezí provedením kontroly velikosti jim odpovídající poměrné plastické deformace ε_{22}, jejíž reálnou hodnotu je možno očekávat poblíž středu intervalu $\varepsilon_{22} \in (0;\ \alpha.\Delta T-\sigma_k/E)$, když

$$\varepsilon_{22} = \alpha.\Delta T-\sigma_k/E-h.\beta_1/L_p \quad (20).$$

Výše uvedené vztahy odvozené pro geometrii segmentu mají platnost pro konkrétní okamžik v časovém intervalu v průběhu ponořování. Na základě zjištěného přetvoření je možno usuzovat na kritické napětí v zinkované součásti a z toho předpovědět zvýšené riziko vzniku trhlin (např. v místě přechodu mezi stojinou a spodní pásnicí profilu). Nicméně, jedná se o přechodný stav a po úplném ponoření a vyrovnání teploty všech částí zinkované součásti napětí poklesne.

2.3. Analýza změny tvaru po pozinkování

Pro poloměr zakřivení ochlazeného pozinkovaného nosníku platí

$$R_1 = L_p/\beta_2 \quad (21)$$

$$R_1+h = L_p.(1-\varepsilon_{22})/\beta_2 \quad (22)$$

a vztah pro závislost úhlu β_2 na velikosti průhybu nosníku y_2 má tvar

$$\sin^2(\beta/2).(L_p/\beta_2)^2-2y_2.(L_p/\beta_2)+y_2^2 = 0 \quad (23).$$

Na základě pravděpodobné velikosti poměrné plastické deformace, jejíž hodnotu

$$\varepsilon_{22} = L_2/L_p-1-\alpha.\Delta T \quad (24)$$

lze předpokládat přibližně uprostřed intervalu $\varepsilon_{22} \in (0;\alpha.\Delta T-\sigma_k/E)$, je možno s určitou mírou nejistoty předpovědět změny geometrie vychladnuté pozinkované součásti (průhyb a kontrakce) a stanovit zbytkové pnutí v součásti od ohybového momentu vyvolaného kontrakcí.

2.4. Dynamika procesu

Při analýze účinků termického procesu při žárovém zinkování na zinkovanou součást je nutno respektovat důležité aspekty:

- termický proces při postupném ponořování zinkovaného prizmatického nosníku do zinkové taveniny způsobuje poměrně rychlý nárůst silových účinků na tuto součást, a to vede ke zpevnění oceli;
- při teplotě běžného prostředí se její mez kluzu zvyšuje;
- při dalším postupném ponořování nosníku se začne jeho dosud relativně chladná horní pásnice prohřívat a vyrovnávají se prodloužení obou pásnic;
- přestup tepla ze zinkové taveniny do zinkované součásti probíhá postupně;
- prohříváním konstrukční oceli nad 400 °C klesá její mez kluzu k nule.

K této dynamice procesu je nutno při posuzování stavu přihlížet.

2.5. Částečně šikmo ponořený nosník

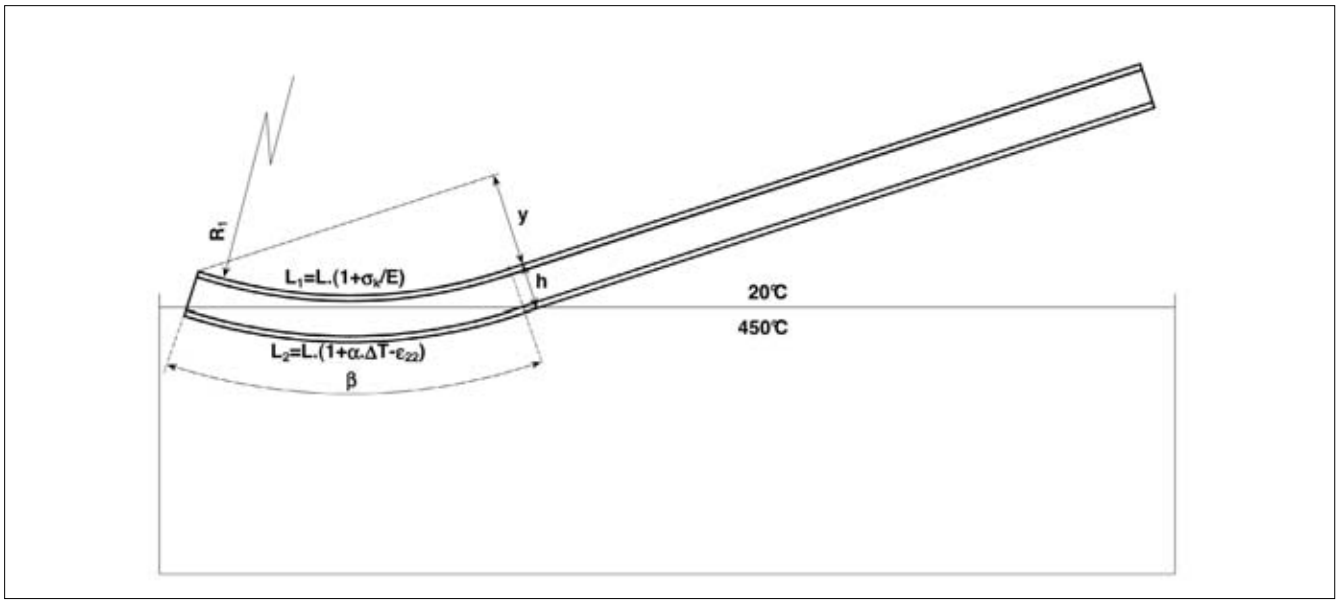
V praxi je narozdíl od příkladu popsaného v předchozí kapitole častější případ, kdy je nosník ponořován pod určitým sklonem a významnou charakteristickou veličinou je délka průsečnice L stěny jeho stojiny s hladinou zinkové taveniny.

Za předpokladu zjednodušení využitého v předchozí analýze bude délka horní chladné pásnice nad ponořenou částí nosníku

$$L_1 = L.(1+\sigma_k/E) \quad (25)$$

a délka spodní ohřáté části pásnice ponořené do zinkové taveniny

$$L_2 = L.(1+\alpha.\Delta T-\varepsilon_{22}) \quad (26).$$



Částečně šikmo ponořený nosník

Pro geometrii takto deformovaného nosníku v délce jeho kontaktu s hladinou zinkové taveniny platí, že

$$y = R_1.(1-\cos\beta) \quad (27).$$

Pak průhyb nosníku je

$$y = (1-\cos\beta).L.(1+\sigma_k/E)/\beta \quad (28)$$

a současně platí

$$h+y/(1-\cos\beta) = L.(1+\alpha.\Delta T-\varepsilon_{22})/\beta \quad (29).$$

Pro stanovení geometrie tvaru částečně šikmo ponořeného nosníku je nutno respektovat omezení $\varepsilon_{22} \in (0;\ \alpha.\Delta T-\sigma_k/E)$ a tvar deformovaného nosníku odvodit od hodnoty poměrné plastické deformace podle (20), jejíž pravděpodobnou velikost je možno očekávat poblíž středu výše uvedeného intervalu.

Z geometrie přetvořeného nosníku lze opět stanovit kritické napětí v zinkované součásti v okamžiku ponořování a z toho usuzovat na riziko vzniku trhlin.

2.6. Analýza změny tvaru po pozinkování

Obdobně jako u segmentu analyzovaného ve 2.3., na základě pravděpodobné velikosti poměrné plastické deformace, jejíž hodnotu podle (20) lze předpokládat poblíž středu intervalu $\varepsilon_{22} \in (0;\ \alpha.\Delta T-\sigma_k/E)$, je možno s určitou mírou nejistoty předpovědět změny geometrie vychladnuté pozinkované součásti (průhyb a kontrakce) a stanovit zbytkové pnutí v součásti od ohybového momentu vyvolaného kontrakcí.

2.7. Zobecnění

Vzhledem k dosažené plastické deformaci je každá žárově pozinkovaná součást postižena určitým stupněm trvalého přetvoření. Pro většinu aplikací je toto přetvoření přijatelné a nebrání účelu použití takových dílců. Způsob a míru výsledných deformací žárově zinkovaných součástí je možno významnou měrou ovlivnit vhodným řešením jejich konstrukce a přizpůsobením postupu zinkování.

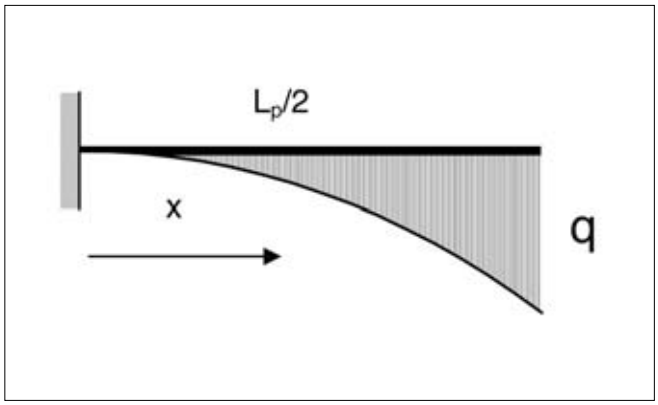
Jak je z provedeného rozboru patrno, velikost poloměru zakřivení částečně ponořeného nosníku nezávisí na jeho délce. Stejně tak ani velikost osové síly v pásnici profilu vyvolané tepelnou roztažností materiálu nezávisí na této délce. Úroveň vnitřního napětí v zinkované součásti je přímo úměrná mezi kluzu zinkovaného materiálu. Z analýzy je zřejmé, že více namáhané jsou relativně krátké součásti zhotovené z vysokých profilů. Součásti zhotovené z ocelí s vyšší mezí kluzu se deformují méně, avšak při vyšším vnitřním pnutí než součásti zhotovené z ocelí s nižší mezí kluzu.

2.8. Komentář

Pro zinkování prizmatických nosníků je nejvýhodnější svislá poloha, kdy je eliminováno namáhání součásti od nerovnoměrného ohřevu a současně svislé plochy umožňují rychlé stékání zinkové taveniny z povrchu součásti. S ohledem na délku nosníku a technické možnosti zinkovny jsou v praxi nosníky ponořovány do zinkové taveniny pod určitým sklonem. Zde hraje významnou roli délka průsečnice stěny stojiny nosníku s hladinou zinkové lázně.

Poměrně vysoké hodnoty vnitřního pnutí od nerovnoměrného ohřevu zinkovaných dílců nemusí z hlediska překročení meze pevnosti materiálu v praxi představovat významnou hrozbu. Skutečné napětí je limitováno mezí kluzu materiálu. Při tom je nutno přihlédnout k faktu, že reálně dosažitelné hodnoty poměrné deformace se pohybují pouze ve zlomcích garantovaných hodnot tažnosti u běžných konstrukčních ocelí. Materiál zinkovaných součástí tedy v důsledku plastického přetvoření relaxuje a extrémy napětí se zastaví na mezi kluzu.

Proto většina zinkovaných součástí přežije šok z žárového pozinkování bez úhony. Je-li ponor proveden dostatečně rychle, není teplotní gradient tak strmý. Pro posuzování rizika porušení celistvosti materiálu je významným faktem, že velikost napětí vyvolaného v zinkované součásti jejím nerovnoměrným ohřevem je úměrná mezi kluzu materiálu, z něhož je zhotovena. Tedy součásti zhotovené z oceli s vyšší hodnotou meze kluzu jsou vystaveny většímu namáhání než součásti zhotovené z oceli s nižší hodnotou meze kluzu.



Spojité zatížení přenášené stojinou nosníku

Ke zvýšenému riziku porušení celistvosti materiálu zinkovaných součástí je nutno přihlížet v případech, kdy se proměnné pnutí od nerovnoměrného ohřevu sčítá s vnitřním stacionárním pnutím, které bylo do součásti vneseno již při výrobě polotovaru a dále při jeho následném zpracování, zejména při svařování. Každý svařenec se vyznačuje přítomností vrubů, které mohou při nepříznivé poloze při zinkování způsobit lokální koncentraci napětí a snížení únosnosti materiálu. Proto je nutno termickou dynamiku procesu žárového zinkování respektovat se vší vážností a již ve fázi konstrukčního návrhu, následně kvalitním řemeslným provedením součástí určených k pozinkování a nakonec i kompetentním přístupem zinkaře eliminovat veškeré nepříznivé faktory, které mohou vést k narušení celistvosti zinkované součásti.

2.9. Napětí ve stojině nosníku

Pro analýzu napětí ve stojině nosníku způsobeného jeho deformací lze vycházet z předpokladu, že ohyb nosníku vyvolá v jeho stojině spojité zatížení s parabolickým průběhem. Při řešení pomocí náhradního vetknutého nosníku jsou hodnoty tahového radiálního i smykového napětí v bodě vetknutí nulové a na konci nosníku, v místě přechodu mezi stojinou a spodní pásnicí, nabývají maxima:

$$q(x) = q.[x/(L_p/2)]^2 \quad (30).$$

3. PŮSOBENÍ ROZTAVENÉHO KOVU

Křehkost oceli vyvolaná tekutým kovem

Na ocel ponořenou do zinkové taveniny působí roztavený kov a zejména prvky s nízkým bodem tuhnutí jako je cín, olovo a bismut iniciují v zatěžované součásti takzvané „praskání za asistence tekutého kovu“ známé rovněž pod pojmem „spájený lom“. V současné době se pro tento fenomén vžil pojem „Liquid metal embrittlement“, ve zkratce LME, nebo „Liquid metal assisted cracking“, ve zkratce LMAC.

První výzkumy v oblasti vlivu roztaveného kovu na ocel provedli v roce 1980 v Japonsku, kde K. Kikuchi při tahových zkouškách oceli na vzorcích vystavených působení vzduchu o teplotě 460 °C a jiných vzorcích ponořených do zinkové taveniny o stejné teplotě prokázal, že tažnost oceli vystavené působení tekutého kovu poklesne na 1/3 oproti hodnotám zjištěným u oceli vystavené působení vzduchu o teplotě 460 °C. Ve stejném období dospěli k podobným závěrům i P. Gordon a H. H. Ann, když prokázali, že tažnost postupně zatěžovaných ocelových vzorků vystavených působení tekutého kovu s rostoucí teplotou taveniny klesá. Ze závislosti nástupu vzniku trhlin na zatížení materiálu při různých teplotách vyplývá, že lze stanovit hodnoty

napětí v materiálu, jejichž překročení je podmínkou pro iniciaci zkřehnutí působením tekutého kovu. V praxi však této skutečnosti nelze dost dobře využít, neboť na jedné straně jsou v materiálu různě orientovaná vnitřní pnutí neznámé velikosti a na straně druhé nelze zcela exaktně podchytit a analyzovat proměnlivá pnutí od nerovnoměrného ohřevu dílce při ponořování do zinkové taveniny. Avšak obecně lze z této skutečnosti vyvodit, že konstrukční oceli v jakosti s nižší mezí kluzu (pod S275) jsou nebezpečím zkřehnutí působením tekutého kovu ohroženy méně než oceli v jakostech s vysokou mezí kluzu (nad S460), jak uvádí Richard Pargeter ve svém příspěvku Liquid metal penetration during hot dip galvanizing.

Nástup vzniku trhlin je samozřejmě ovlivněn i vnější geometrií povrchu zinkovaného podkladového materiálu, a to jak z hlediska nespojitostí v povrchové vrstvě oceli, tak i z hlediska konstrukčního řešení a dílenského provedení zinkovaných součástí. Kombinace pnutí v ocelových součástech a působení roztaveného kovu na jejich povrch při nevhodném konstrukčním řešení stavebních dílců a při nesprávném postupu jejich ponořování do zinkové taveniny zvyšují nebezpečí vzniku trhlin, které, pokud nejsou včas rozpoznány, mohou u nosných ocelových stavebních dílců vést k následnému selhání konstrukce.

Na výzkumech zaměřených na problematiku LME se podílela rovněž společnost Wiegel, která společně s firmou Arcelor, dodavatelem ocelových polotovarů, a s firmou Doppelmayr, výrobcem sedačkových lanovek s celosvětovou působností, uskutečnila celou řadu experimentů, na jejichž vyhodnocení se podílel mimo jiné i profesor Markus Feldmann z institutu RWTH Aachen.

Zkoušky vycházely z předpokladu, že trhliny vznikají zejména na konstrukcích řešených bez možnosti volného rozpínání, a to v místech výskytu velké koncentrace napětí, především u vrubů na zinkovaných součástech, v místech svarových spojů a dále v místech skokové změny tuhosti prvku. K iniciaci vzniku trhliny přispívá stacionární vnitřní pnutí či lokální vytvrzení u podkladového materiálu, stejně jako geometrie jeho povrchu. Pro technologii žárového zinkování platí, že vznik trhlin dále ovlivňují parametry procesu chemické předúpravy (především způsob moření a kvalita tavidla), vlastnosti zinkovací lázně (obsah legur a teplota) a v neposlední řadě způsob provádění ponoru zinkované součásti do zinkové lázně (sklon vůči hladině a rychlost ponořování).

V rámci skupiny Wiegel byly provedeny srovnávací zkoušky pozinkování vzorků ve dvou zinkovnách provozovaných s odlišným složením zinkové taveniny. Jednou byla zinkovna ve Velkém Meziříčí s obsahem cínu 0,785 % a bismutu 0,169 %. Druhým pracovištěm byla zinkovna ve Stuttgartu, kde se pracuje se zinkovou taveninou bez příměsi cínu a obsah bismutu byl 0,100 %. Obě zinkovací lázně jsou bez příměsi olova. Zkušební vzorky o délce 2 m byly zhotoveny z válcovaných profilů IPE 600, IPE 750, IPEA 600, W2309.84, HP356x109, HP356x133 a W30.10.116 vyrobených z ocelí o jakostech S275 až S460. Na obou koncích každého vzorku byla přivařena příruba do poloviny výšky stojiny nosníku a vždy jeden konec vzorku byl ponechán ve stavu po svaření a druhý konec, s cílem snížit úroveň zbytkového vnitřního pnutí v materiálu, byl tepelně zpracován ohřevem na teplotu 600 °C a bez výdrže na vzduchu ochlazen.

Vzorky prošly v každé zinkovně řádným procesem chemické předúpravy zahrnujícím odmaštění v kyselém odmašťovacím prostředku, moření v kyselině solné a nanesení tavidla. Po osušení na vzduchu s využitím tepla přijatého v lázni s tavidlem byly pod úhlem 15 ° rychlostí do 8 m/min. zanořeny do zinkové lázně a po prodlení 8 min. vytaženy a ponechány k ochlazení na vzduchu. Předmětem zkoumání byl výskyt trhlin vycházejících z vrubu tvořeného ukončením příruby v polovině výšky stojiny nosníku.

Výsledky těchto zkoušek naznačují, že zinkové lázně s nižšími obsahy kovů s nízkou teplotou tavení mají příznivý účinek pro eliminaci vzniku trhlin při žárovém zinkování.

Směrnice DASt 022

Případy vážných havárií žárově pozinkovaných ocelových stavebních konstrukcí, ke kterým v minulosti došlo z důvodu selhání statiky stavby, přiměly Německý institut pro Stavební technologie (Deutsche Institut für Bautechnik, DIBt), aby se danou problematikou začal vážně zabývat a hledal účinná opatření. Přijaté řešení spočívá ve vypracování pravidel pro navrhování, výrobu a žárové zinkování nosných dílců ocelových konstrukcí. Tímto odpovědným úkolem byl pověřen Německý výbor pro ocelové stavby (Deutsche Ausschuss für Stahlbau, DASt) a v září 2009 byla oficiálně vydána směrnice DASt 022, která se k 1. lednu 2010 stává závazným dokumentem pro nově popsaný stav techniky. Po praktickém ověření bude tato směrnice zavedena jako dodatek evropských technických norem pro žárové zinkování (EN ISO 1461 a EN ISO 14713).

Směrnice DASt 022 je výsledkem intenzívní spolupráce celé řady německých vědeckých pracovišť a shrnuje v sobě nejnovější poznatky a výsledky výzkumů nejen z oblasti křehkosti oceli vyvolané tekutým kovem, ale vychází především z praktických aplikací termomechaniky i pružnosti a pevnosti, zejména v oblasti tváření a vlivu vrubů na pevnostní charakteristiky oceli.

IV. ZÁVĚR

Otázka vzniku trhlin v důsledku kontaktu zinkovaných součástí s tekutým kovem je komplexním problémem, kde prioritní roli hraje značné pnutí v materiálu při nerovnoměrném ohřevu. Toto

Podélná prasklina ve stojině nosníku IPE 550 s přírubou do poloviny výšky profilu

pnutí je limitováno omezeným přísunem energie, materiál postupně relaxuje a napětí v něm se ustálí na hodnotách do jeho meze kluzu. Takto způsobené poměrné deformace hladkých ocelových součástí jsou hluboko pod hodnotami tažnosti oceli a zpravidla zůstane jen u akceptovatelného přetvoření. Povrch mnohých zinkovaných ocelových dílců se však vyznačuje přítomností četných vrubů, které špičky napětí v materiálu umocňují. Přičte-li se k tomuto stavu snížení tažnosti materiálu působením tekutého kovu, pak u některých nešťastně navržených a nekvalitně provedených dílců je porušení jejich celistvosti při žárovém zinkování pravděpodobné. Zevrubná znalost vlivu vrubů a termodynamiky procesu nerovnoměrného prohřívání materiálu při postupném ponořování do horké lázně jsou základním předpokladem pro bezpečnost žárově zinkovaných ocelových konstrukcí. V tomto směru je nově vydaná směrnice DASt 022, zejména ve svém oddíle 4, významným přínosem a dodržování navržených zásad potřebnou bezpečnost žárově zinkovaných ocelových staveb bezesporu zajistí.

Z provedených výzkumů bylo možno vyvodit důležitý závěr v tom smyslu, že nelze hovořit o žárovém zinkování jako o nevhodném systému protikorozní ochrany pro nosné prvky ocelových konstrukcí, ale že vzniku trhlin vždy předchází kritická kombinace celé řady faktorů, které společně vznik trhlin iniciují. Především je nutno pro tento systém protikorozní ochrany přizpůsobit konstrukční řešení a dílenské provedení zinkovaných dílců.

Ohledně jevu LME současná úroveň poznání prozatím nedovoluje přijímat jednoznačné závěry a fenomén vlivu roztaveného kovu si nepochybně zaslouží další aplikovaný výzkum.

V souvislosti s tématem, jemuž byl věnován tento příspěvek, patří poděkování profesoru Františku Waldovi, který pro tento účel poskytl cenné informace z výsledků zkoušek chování konstrukčních ocelí za zvýšených teplot.

Vlastimil Kuklík,
Wiegel CZ žárové zinkování s. r. o.,
Czech Republic

LITERATURA:

[1] Ing. Petra Kallerová, Prof. Ing. František Wald, CSc.: Mechanické vlastnosti ocelí za zvýšených teplot

[2] Dr. Werner Katzung: Rissbildung im Stahlbau – Besonderheiten und Ursachen

[3] Dr. Werner Katzung, Dr. Wolf-Dieter Schulz: Beitrag zum Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen – Ursachen und Lösungsvorschläge zum Problem der Rissbildung

[4] DASt – Richtlinie 022, Entwurf 29. April 2009

Jaké výhody a nevýhody mají legované zinkové taveniny?

Zinková tavenina pro kusové zinkování podle DIN EN ISO 1461 může vlivem cíleného přidávání dalších legur k základní zinkové tavenině obsahovat tyto kovové složky: hliník, olovo, hořčík, nikl, titan, vanad, vizmut, cín.

Otázky, které přitom vznikají, jsou stále stejné:

Čeho se má dosáhnout?

Jaká je správná koncentrace?

Jaké jsou výhody?

Jaké jsou nevýhody?

Rozpustnost vybraných kovů v tavenině čistého zinku v % udává tabulka 1. Při tom je ale třeba upozornit na to, že literární údaje nejsou vždy konzistentní a vznikají další závislosti na druhu koncentracích legujících prvků.

DIN EN ISO 1461 – výslovně a pro praxi zavádějícím způsobem stanovuje, že součet všech legujících prvků nesmí překročit 2 %, bez železa a cínu tedy jen 1,5 %.

A. OBECNĚ

K působení jednotlivých legujících prvků se dá říci následující:

1. Hliník

- Hliník chrání zinkovou taveninu v koncentracích od 10^{-3} % tím, že na jejím povrchu vytváří velmi tenký film Al_2O_3 a tím brání rychlé **oxidaci** vzduchem.
- Hliník působí minimálně u ocelí s vysokým obsahem křemíku **jako snižující tloušťku povlaku** vlivem časově omezené tvorby pevně přilnavé vrstvy Al_5Fe_2 – nebo podobných sloučenin na rozhraní ocel/zinek.
- Hliník zvyšuje **lesk** povlaků a dále
- jejich **odolnost na ohyb**.

Avšak:

- Při koncentracích více než 0,03 % Al v tavenině stoupá nebezpečí vzniku **nepozinkovaných míst** (černé skvrny).
- Při více než 1 % Al v tavenině se výrazně zvyšuje její povrchové napětí se stejnými důsledky, jak je uvedeno výše.

2. Olovo

- Olovo snižuje **povrchové napětí** zinkové taveniny.
- Olovo usnadňuje **vytahování tvrdého zinku**.
- Olovo chrání **dno vany** proti rozpouštění zinkem, pokud byla vana správně uvedena do provozu a vytvořila se kompaktní a rovnoměrná δ_1-fáze.

Avšak:

- Olovo zvyšuje principiálně nebezpečí **korozního praskání indukovaného kapalným kovem**, a dále
- Olovo snižuje ve středních koncentracích **tekutost** zinkové taveniny

Tabulka 1 – Rozpustnost vybraných legujících prvků v zinkových taveninách, * různé literární údaje.

Prvek	Zinková tavenina (450 °C)
Hliník	15
Olovo	1,15
Železo	0,038
Nikl	0,06
Vismut	2 do 5*
Cín	100