

## **Vodíkové křehnutí**

Rolf Jansen a Patricia Preikschat

květen 2002  
2. vydání

V různých fázích procesu galvanického zinkování oceli vzniká na povrchu dílů vodík. To je dáno postupem. Děje se tak při moření, při katodickém elektrolytickém odmašťování i při vlastním zinkování. Vodík může difundovat do základního materiálu a ovlivnit vodíkovým křehnutím zejména kalené díly tak, že se při namáhání lámají.

Jak by měla předúprava, zejména moření, vypadat, aby bylo zabudování vodíku co nejmenší?

Existují u zinkovacích postupů rozdíly a jaký mají vliv; dají se použít všechny elektrolyty?

Jak se dá zabudovaný vodík nejlépe a nejbezpečněji odstranit, aniž by poškodil zinkovou vrstvu?

Tato *Technická informace* poskytuje odpovědi na tyto otázky a diskutuje koncepty a opatření k zabránění vodíkového křehnutí.

<b>1</b>	<b>Tvorba vodíku</b>	<b>3</b>
1.1	Cesty vodíku	3
<b>2</b>	<b>Test na vodíkové křehnutí a zkušební díly</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Opatření proti zabudování vodíku</b>	<b>7</b>
3.1	Moření minerálními kyselinami	7
3.2	Elektrolytické odmašťování	8
3.3	Zinkovací lázeň	9
3.4	Stahování	9
<b>4</b>	<b>Tepelná úprava pro odvodíkování</b>	<b>10</b>
4.1	Principy tepelné úpravy	10
4.2	Klasická dvoustupňová metoda (stará DIN)	11
4.3	Jednostupňová metoda	12
4.4	Nová metoda: Chráněná tepelná úprava	13
4.5	Difuzibilita zinkových vrstev	14
4.5.1	Praktický test: Efúzní chování zinkových vrstev z různých elektrolytů	14
4.5.2	Vyhodnocení	15
<b>5</b>	<b>Shrnutí</b>	<b>17</b>

### **Příslušné normy**

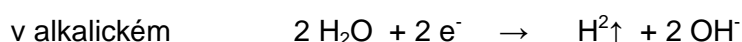
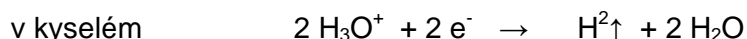
DIN 50 961, 50 969

BOSCH-Norm N67F

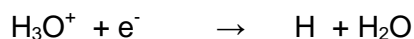
ISO/DIS-9588

## 1 Tvorba vodíku

Při moření v minerálních kyselinách, při katodickém elektrolytickém odmašťování i při vlastním zinkování vzniká vodík. Přitom se ve všech případech jedná o katodickou redukci. Při moření v minerálních kyselinách probíhá příslušný anodický dílčí krok - zde rozpouštění kovu - na stejném místě jako tvorba vodíku; při elektrolytickém odmašťování a zinkování naproti tomu probíhá příslušná tvorba kyslíku popř. rozpouštění kovu odděleně na anodě:



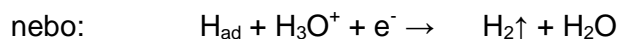
Uvedené reakce probíhají krok za krokem, tzn. hydroxylové ionty odevzdávají náboj jeden po druhém, popř. molekuly vody se štěpí jedna po druhé. Přitom vzniká v každém případě nejprve atomární vodík.



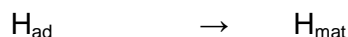
### 1.1 Cesty vodíku

Atomární vodík potřebuje nutně partnera pro vazbu a je proto nanejvýše reaktivní. Než narazí na další atom vodíku, vystačí s atomy železa na povrchu dílu jako partnery pro vazbu. V tomto případě se mluví o adsorbovaném (atomárním) vodíku  $\text{H}_{\text{ad}}$ . Adsorbovaný atomární vodík se může vázat s jiným svého druhu v molekulu  $\text{H}_2$ , která nakonec vystoupává v bublinkách plynu a již neznamena žádná nebezpečí pro základní materiál. Adsorbovaný atomární vodík může ale také difundovat do základního materiálu a tam poškodit jeho strukturu.

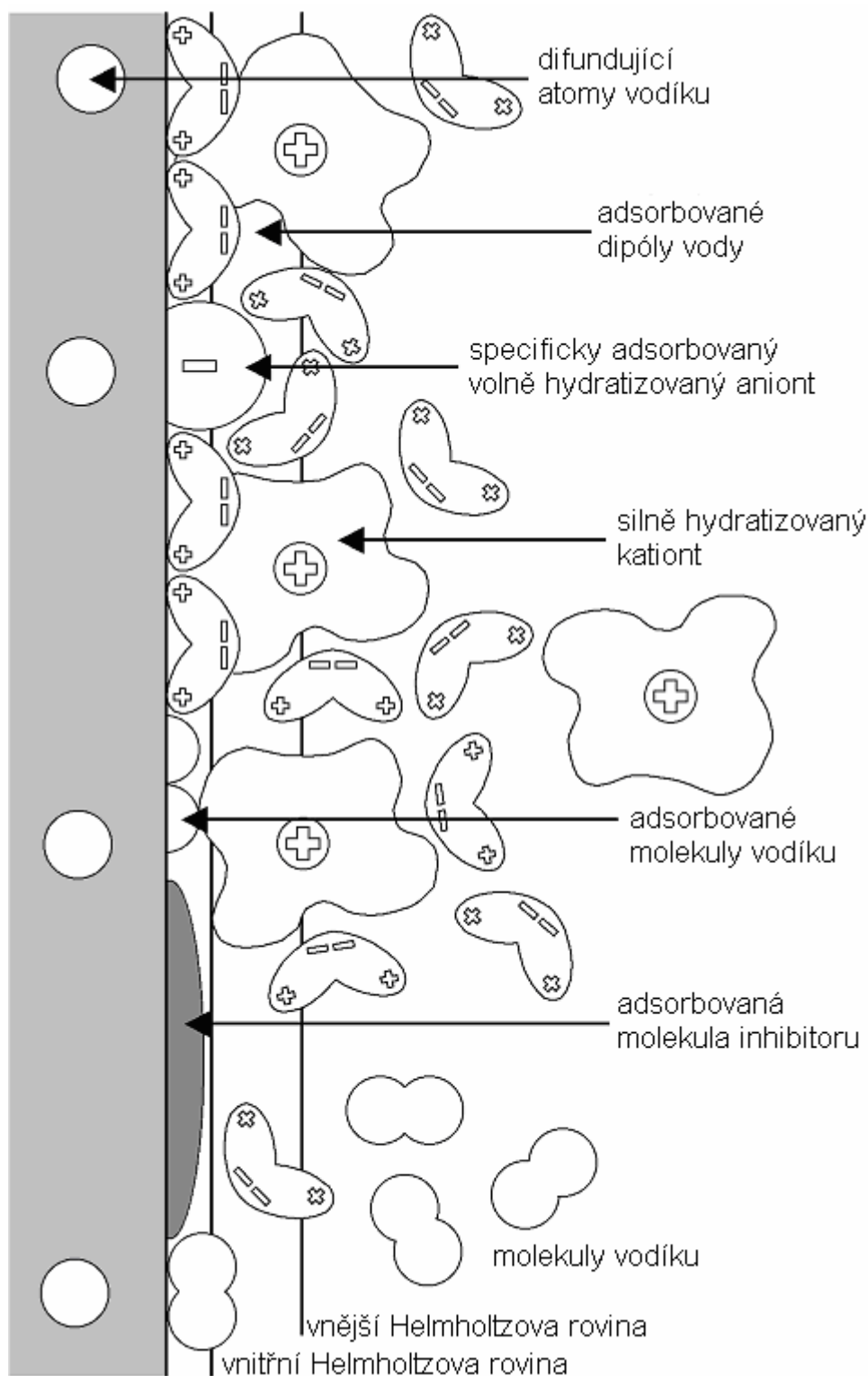
*Kombinace v plynný  $\text{H}_2$ :*



*Difuze do vnitřku materiálu:*



Kovový povrch v elektrolytu vykazuje obecně vrstvu z adsorbovaných složek elektrolytu, např. molekul vody, kationtů, aniontů nebo organiky (inhibitorů, tenzidů), **obr. 1**. Stupeň pokrytí (poměr plochy pokryté jedním druhem částic k celkové ploše) závisí na elektrochemickém potenciálu částic, teplotě a koncentraci všech složek v elektrolytu.



**Obr. 1:** Kovové povrchy v elektrolytu jsou vždy pokryty adsorbovanými složkami elektrolytu

Dle zákonů difúze probíhá transport atomárního vodíku do vnitřku materiálu tím rychleji, čím je větší rozdíl mezi povrchovou koncentrací  $H_{ad}$  (= stupněm pokrytí) a koncentrací H ve vnitřku. To znamená, vysoký stupeň pokrytí atomárním vodíkem má za následek rychlejší zabudování vodíku do materiálu a naopak.

Rozhodující je také doba expozice: při krátkých dobách zpracování má jen málo vodíku příležitost zabudování do materiálu.

## 2 Test na vodíkové křehnutí a zkušební díly

Kalené díly se obecně po zpracování testují, jestli byly poškozeny vodíkovým křehnutím. Podle druhu dílů se provádějí zkoušky napínáním, tahem nebo ohýbáním. Jelikož se jedná o destruktivní zkoušku, testuje se vždy jenom malý výběr jedné šarže. Přesto má test dát spolehlivou výpověď pro celou šarži.

Jedna možnost je, zpracovat vhodné zkušební díly společně se zbožím a testovat zkušební díly a malou část zboží napínáním, tahem nebo ohýbáním. Jestliže

- zkušební díly reagují citlivěji na vodíkové křehnutí než zboží
- zkušební díly proběhnou společně se zbožím všechny kroky procesu
- zkušební díly jsou srovnatelné vzhledem k povrchové úpravě
- se poškození zkušebních dílů dá bezpečně zjistit
- se společně testovaly zkušební díly a vhodně velká část zboží

dávají výsledky zkoušky dostatečnou jistotu pro kontrolu jakosti.

Jako zkušební díly se použijí pojistné kroužky: DIN 471; 5 x 0,6; 650 HV, které byly poprvé navrženy pracovníky centrálního výzkumného oddělení FV/PLO1 fy BOSCH ve Schwieberdingen.

Test se potom provádí následně:

Vždy 25 pojistných kroužků proběhne všechny procesní stupně galvanického zinkování společně se zbožím. Poté se kroužky natáhnou na skleněnou tyč s poloměrem přesně 5 mm pomocí speciálních kleští. Kleště mají stavěcí šroub, takže příliš velké roztažení kroužků může být vyloučeno. Kroužky se musí dát natáhnout aniž by praskly. Test je úspěšný, když i po 24 h čekání ani jeden nepraskne.



**Obr. 2:** Testovací sada na vodíkové křehnutí

Kroužky se hodí také pro testování jednotlivých stupňů procesu např. hodnocení přísad do moření nebo pro testování efektivity tepelné úpravy.

Pro testování např. přísady do moření se vloží na testovací skleněné tyči navlečené kroužky do testované mořící lázně, **obr. 3**. Použije se vysoká skleněná nádoba, protože pojistné kroužky za určitých podmínek velmi prudce praskají a jejich úlomky mohou být vymrštěny. V každém případě je nutné nosit ochranné brýle.

V odstupech 1 až 5 min se spočítají prasklé kroužky a vynesou se do grafu v závislosti na čase.

Při porovnání přísad do moření se takto obdrží různě strmé křivky v závislosti na efektivitě inhibice (viz **obr. 4** v následující kapitole).



**Obr. 3:** Pojistné kroužky v testu moření

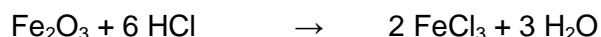
### 3 Opatření proti zabudování vodíku

Obecně by měl být stupeň pokrytí atomárním vodíkem v procesu moření, elektrolytickém odmašťování a zinkování co nejmenší. Doba expozice by měla být co nejkratší.

#### 3.1 Moření minerálními kyselinami

Koncentrace vodíku v mořících lázních je velmi vysoká a doba expozice je často velmi dlouhá. Vysokopevnostní díly by se proto nejlépe neměly vůbec mořit. Přesto jsou většinou tak silně znečištěné popř. pasivní, že se bez mořícího stupně nedají vůbec zpracovat. Proto by se mělo mořit pokud možno co nejkratší dobu; dle příslušných norem [1] nesmí u kritických dílů doba moření překročit 5 min. Je lepší, mořit kratší dobu s vyšší koncentrací kyseliny, než déle s nižší koncentrací.

Vrstvy oxidu a okují popř. rez se rozpouští v kyselině bez vývoje vodíku:



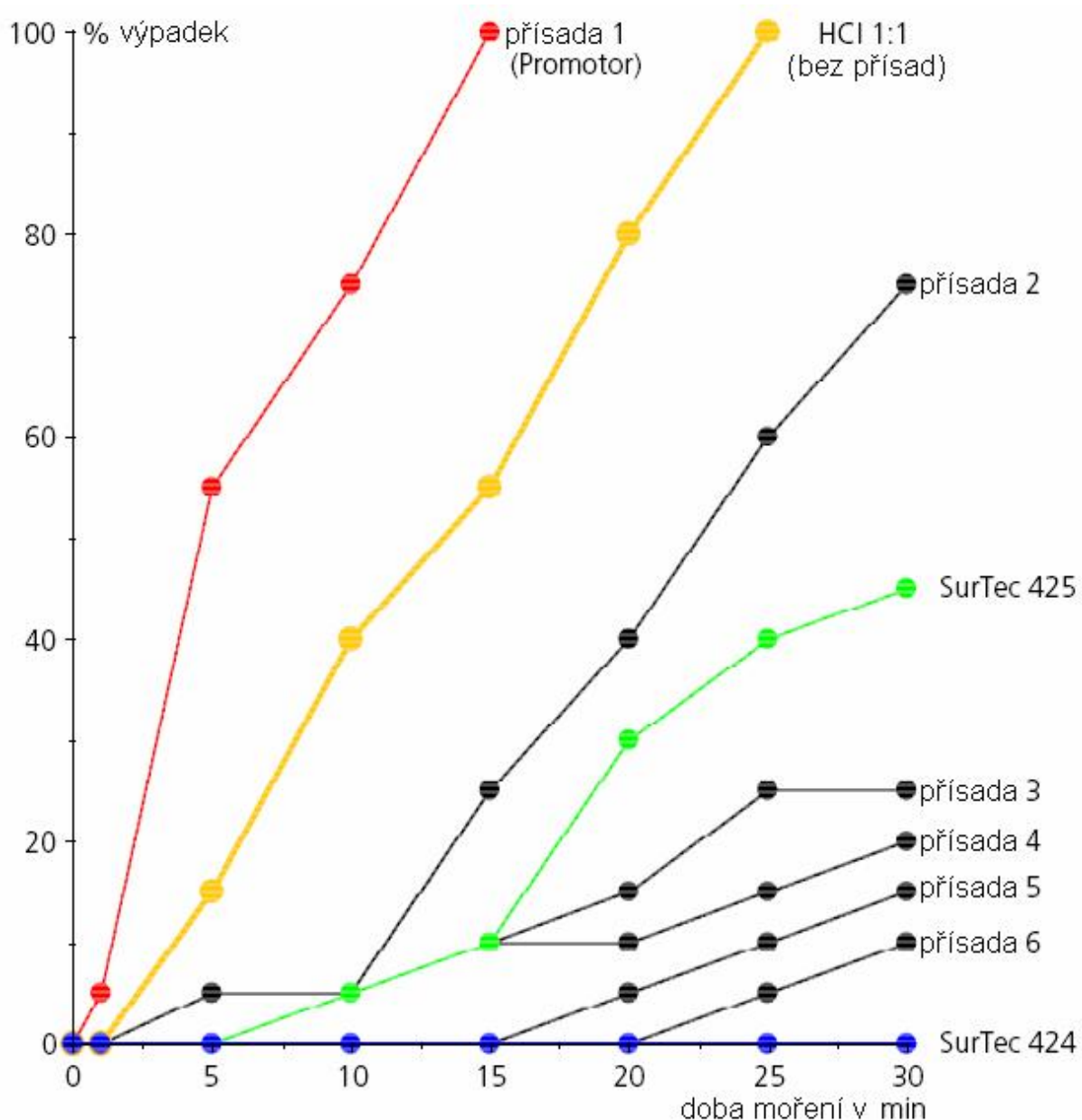
Vodík vzniká až když kyselina rozpouští základní kov. Protony jsou oxidační činidlo. Oxidují železo a jsou přitom samy redukovány na elementární vodík.



Vhodné molekuly inhibitoru jsou chemicky adsorbovány holým povrchem železa a současně nedrží na oxidovaných místech povrchu. Takto zabraňují rozpouštění železa a tím tvorbě vodíku, aniž by ale omezovaly vlastní funkci moření, totiž rozpouštění oxidů.

Přitom se vhodnými přísadami do moření zmenšuje stupeň pokrytí atomárním vodíkem a volný vodíkem obsaditelný povrch.

Inhibované moření se ale nedá bez výhrad doporučit. Existují inhibitory do moření, které atomárnímu vodíku ztěžují kombinovat se k molekulárnímu vodíku (promotorový efekt). Nutí ho prakticky k difúzi do železa.



**Obr. 4:** Existují více a méně vhodné inhibitory vzhledem k zabudování vodíku (mořící lázeň ve všech zkouškách HCl 1:1 při teplotě místnosti)

Cíleným nasazením vhodných inhibitorů do moření existuje možnost pracovat s koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou. Tyto inhibitory do moření téměř zabraňují tvorbě vodíku a tím tvorbě aerosolu a chlorovodíkových par.

Vhodná inhibice se dá velmi dobře tvořit přípravkem **SurTec 424**. Je speciálně optimalizován na minimální vodíkové křehnutí vysokopevnostních ocelových dílů.

### 3.2 Elektrolytické odmašťování

Kalené díly nesmí být v žádném případě katodicky elektrolyticky odmašťovány. Smí být pouze anodicky elektrolyticky odmašťovány. Koncentrace vodíku a doba expozice při katodickém elektrolytickém odmašťování je velmi vysoká a proto je to dle příslušných norem pro kritické díly zakázáno.

### 3.3 Zinkovací lázeň

Zinek působí jako difúzní bariéra pro atomární vodík, a tak se často myslí, že vývoj vodíku při galvanickém zinkování je jen kritický, pokud se ještě nevytvořila krycí vrstva zinku. Ve skutečnosti ale absorbují i inhibované předupravené díly během zinkování vodík, zejména v alkalických elektrolytech.

Slabě kyselé elektrolyty mají vyšší proudový výtěžek než alkalické typy elektrolytů, tzn. vzniká celkem méně vodíku. Na druhé straně jsou množství vodíku potřebná pro úplné pokrytí a tím pro maximální rychlost difúze tak nízká, že je nacházíme i ve slabě kyselých elektrolytech.

Vliv typu elektrolytu a složení lázně na zabudování vodíku musí být diskutován v souvislosti s proudovým výtěžkem a rozptylem. Všechna opatření, která vedou ke zvýšení proudového výtěžku působí pozitivně. Lepším rozptylem se rychleji pokryjí zinkem i místa v oblasti nižší proudové hustoty, čímž klesá zabudování vodíku.

### 3.4 Stahování

Občas dochází k tomu, že jsou díly špatně pokoveny a potom se musí stahovat a opět galvanizovat. U kalených dílů je nutné postupovat zvlášť opatrně. Stahování se provádí obvykle v kyselině chlorovodíkové při prudkém vývoji vodíku. Přitom je na holých místech oceli vidět zvlášť prudký vývoj vodíku. To je způsobeno nižším přepětím železa ve srovnání

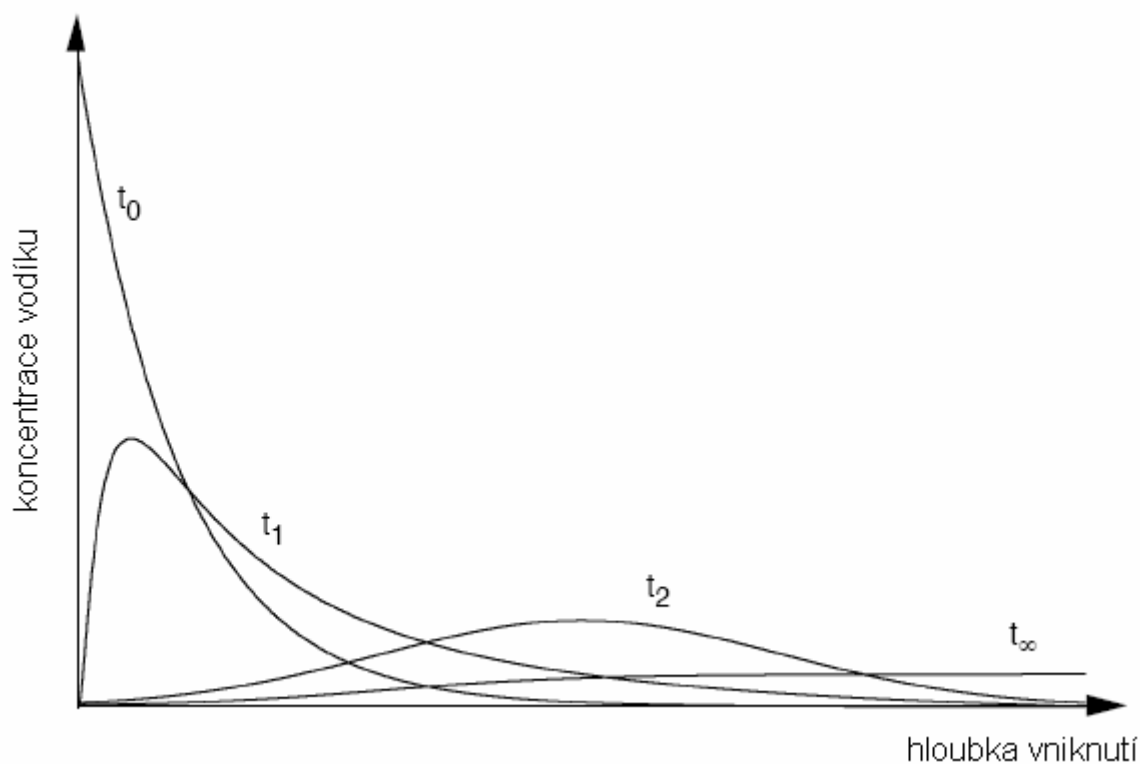
se zinkem. To ale současně znamená, že i ten nejlepší inhibitor v této situaci nefunguje. Díly absorbují tedy obrovské množství vodíku a nesmí být beze všeho opět zinkovány a expedovány. Kalené odzinkované díly musí být nutně podrobeny tepelné úpravě. Postup je nutné v každém případě dohodnout se zákazníkem.

## **4 Tepelná úprava pro odvodíkování**

### **4.1 Principy tepelné úpravy**

Mnoho kovů, mezi nimi i železo, je schopno rozpouštět atomární vodík za tvorby odpovídajících hydridů kovů. Tím se mění struktura materiálu, materiál křehne. Vlastní poškození vzniká pnutím. Chyby ve struktuře podporují tento proces ještě dále a tak mohou být kritické díly doslova roztrhány.

Vnikání vodíku do základního kovu může být v různých fázích procesu galvanického zinkování minimalizováno, ale ne zcela vyloučeno. Pokud je vodík v železe atomárně rozpuštěn, může být do určité míry opět vypuzen. Přitom je třeba vidět, že se hlavní podíl vniklého vodíku po galvanické úpravě ještě nachází v blízkosti hranice fází železo/zinek. Tím vzniká vysoký gradient koncentrace ve směru ke hranici fází, který by zpočátku mohl napomoci rychlému vypuzení. Odbouráváním gradientu koncentrace klesá rychlost migrace (**obr. 5**).



**Obr. 5** Průběh koncentrace vodíku v dílu po různých dobách  
 $t_0$ : přímo po úpravě       $t_1$ : krátce po úpravě  
 $t_2$ : po několika hodinách       $t_\infty$ : rovnovážný stav

Na druhé straně existuje také gradient koncentrace ve směru do vnitřku materiálu, který vede k tomu, že část vodíku vniká hlouběji do materiálu. To rovněž vyrovnává rozdíly koncentrací, takže rychlost migrace klesá. Z toho vyplývá, že by tepelná úprava měla začít co nejrychleji, aby byl využit počáteční vysoký gradient koncentrace ve směru na povrch.

## 4.2 Klasická dvoustupňová metoda (stará DIN)

Po nárazovém pozinkování 3-4  $\mu\text{m}$  zinku se díly tepelně upravují při požadované teplotě (zpravidla 180-200  $^\circ\text{C}$ ) po dobu cca 2 hod, následně se zinkují na konečnou tloušťku vrstvy, poté se znovu tepelně upravují a nakonec se chromátují.

Tento postup v sobě ale skrývá rizika:

- tloušťka vrstvy je už větší než je stanoveno, tím se temperuje příliš krátce, vodík zůstává v dílu;
- vrstva zinku je při vyšších teplotách (> 215 °C) v závislosti na druhu postupu silněji napadena, to způsobuje matnutí, vady vzhledu a přinejhorším dokonce tvorbu puchýřů;
- vrstva zinku je příliš tenká; po temperování se dostává během aktivace částečně opět železo do styku s kyselinou, při tom a při následném zinkování je opět vystaveno vnikání vodíku.

Hlavní nevýhoda dvoustupňové metody je ale komplikovaný postup a značně delší doba zpracování; často se proto druhá tepelná úprava vynechává a tím se na sebe bere riziko celkem příliš krátkého odvodíkování. Ovšem tak zůstane vzhled vrstvy zinku a chromátu v dalším sledu bez problémů zachován.

### 4.3 Jednostupňová metoda

Nějakou dobu je již známo, že zinek jako difúzní bariéra pro vodík přece jen není tak neprostupná, a že použijí-li se dostatečně vysoké teploty a dlouhá doba, lze s velmi vysokou jistotou i dodatečně ještě vypudit plyn. Při jednostupňové metodě se zinkuje na konečnou tloušťku vrstvy, tzn. částečně až do 20 μm, poté se suší a nakonec temperuje při 210-240 °C.

Teplota se ale nedá libovolně stupňovat. Při 225 °C začíná zesílená oxidace zinku na vzduchu. Kromě toho má zinek při této teplotě již značný tlak plynu. Pro rozumnou tepelnou úpravu je tím horní hranice u 225 °C.

Jako rizika tohoto postupu je třeba uvést:

- Případně se temperuje příliš krátce;
- Při větším zabudování vodíku může dojít k tvorbě puchýřů ve vrstvě zinku, protože dochází k zácpě na hranici fází železo/zinek (toto nebezpečí se dá podstatně zmenšit, když se díl - v rozporu s ekonomickými požadavky - pomalu zahřívá, případné rychlé počáteční vypuzování probíhá potom mírněji).

- Při teplotách nad 220 °C a při delších dobách zpracování již od 200 °C je vrstva zinku oxidačně napadena atmosférickým kyslíkem. Napadení může probíhat podél pórů až do hloubky zinkové vrstvy a ovlivňovat vzhled. Díly matnou a šednou. Tím může utrpět korozní ochrana následně provedeného chromátování.

Tato jednostupňová metoda se vyznačuje tím, že se chromátuje až po provedené tepelné úpravě; díly musí na aktivaci a chromátování znovu do linky. Náklady na zpracování jsou přesto značně nižší než u dvoustupňové metody, a u méně fází procesu je procesní bezpečnost vyšší. Opětné vniknutí vodíku v druhém kroku galvanizování je vyloučené. Vyšší teplotou může být ale případně povrch zinku poškozen.

#### 4.4 Nová metoda: Chráněná tepelná úprava

Možnost provést tepelnou úpravu až na konci galvanického procesu, tzn. po chromátování, byla poprvé otevřena novými teplotně odolnými trojmocnými modrými chromáty (např. **SurTec 662**, **SurTec 664**, **SurTec 667**). V těchto lázních vytvořené vrstvy chromátu přežijí tepelnou úpravu do 215 °C přes 24 hod a chrání tím bezpečně vrstvu zinku pod nimi. Lesk a barva systému vrstev zůstává zachována.

Metodou chráněné tepelné úpravy se stává jednokrokové zinkování bezpečné; výhody se dají využít aniž by byl povrch zinku ohrožen.

Při temperování pozinkovaných a modře chromátovaných dílů se z podstaty ztrácí v závislosti na teplotě a době určitý podíl korozní ochrany. Aby u modře pasivovaného hromadného zboží zůstala i po temperování zachována korozní ochrana dle DIN 50 961, měl by se brát ohled na dvě věci:

- Při temperování se vrstva ztenčuje. Díly na temperování by měly proto být trochu silněji chromátovány (delší doba ponoru a/nebo vyšší koncentrace lázně, viz SurTec Technická informace 7), takže jsou před temperováním nazelenalé až nažloutlé. Po temperování jsou pak čistě modré a mají na základě silnější vrstvy chromátu lepší korozní ochranu.
- Obsah vody by měl z vrstvy chromátu unikat pomalu. Temperovací metoda, při které jdou díly do studené pece a dosahují tam pomalu konečné teploty, je optimální. Při

vkládání dílů do přehřáté pece uniká voda explozivně a případně silněji poškozuje vrstvu chromátu.

Výhodné je především, že vrstva zinku je během chráněné tepelné úpravy chráněná před oxidativním napadením atmosférickým kyslíkem. Kvalita zinku je znatelně lepší než u nechráněné tepelné úpravy.

Žluté, olivové a černé chromáty se tak či tak nedají před temperováním aplikovat, protože je vysoká teplota zničí. Výhoda chráněné tepelné úpravy se dá ale přesto využít, protože se modře chromátované díly dají bez problému dodatečně žlutě, olivově a černě chromátovat.

#### **4.5 Difuzibilita zinkových vrstev**

Má typ elektrolytu vliv na difuzibilitu vrstvy zinku? V praxi a v literatuře se dají stále znovu vypátrat různé nálezy. Tendenčně existuje názor, že se vrstvy zinku z kyanidických elektrolytů dobře, z bezkyanidových alkalických naproti tomu velmi špatně a z kyselých vlastně vůbec nedají zbavit plynu. Proto také dle stávajících norem lesklé vrstvy a kyselé elektrolyty sice nejsou zakázané, ale přece jenom podléhají zvláštnímu povolení.

Vliv typu elektrolytu na difuzibilitu je vlastně překvapivý, protože se galvanicky vyloučená vrstva zinku skládá z velmi čistého zinku. Analyticky se najde extrémně málo zabudovaného uhlíku, tzn. zabudované organiky, spíše ještě zabudované železo, především u alkalických elektrolytů. Takže prakticky nalezený rozdíl by se dal odvodit jenom z morfologie. A tady existují skutečně na postupu závisící rozdíly.

##### **4.5.1 Praktický test: Efúzní chování zinkových vrstev z různých elektrolytů**

Aby byla zodpovězena výše diskutovaná otázka, byla provedena níže popsaná řada testů s různými zinkovacími postupy.

Zkušební materiál: Speciálně zhotovené vysoce kritické pojistné kroužky dle DIN 471, 5x0,6 mm, 650-680 HV, úmyslně příliš krátce popuštěné.

Předúprava: Pro každý typ elektrolytu bylo vždy 950 pojistných kroužků 10 min alkalicky odmaštěno, 5 min katodicky odmaštěno, 5 min mořeno v 1:1

HCl bez inhibitoru, opět 20 s katodicky a 20 s anodicky odmaštěno, 3 min v 5 % HCl dekapováno.

**Zinkování:** Bez mezioperačního odvodíkování bezprostředně po této úmyslně silně vodíkem zatěžující předúpravě v bubnu po dobu cca 2 hod v každém elektrolytu, tloušťka vrstvy  $\geq 17 \mu\text{m}$ .

**Zkušební elektrolyty:** Byly použity standardní roztoky následujících typů elektrolytu:

bezkyanidový alkalický lesklý zinek,

slabě kyanidový lesklý zinek,

slabě kyselý lesklý zinek,

slabě kyselý matný zinek.

Všechny tři lesklé zinky byly nastaveny na cca stejný stupeň lesku (dobrý lesk, žádný mastný lesk), technický zinek byl matný až nejvýše pololesklý.

**Tepelná úprava:** Při 180, 210, a 225 °C po 2, 4, 6, 8, 10 a 22 hod.

**Test:** Natažením pojistných kroužků na zkušební tyčinku (po 50 pro postup, teplotu a dobu úpravy).

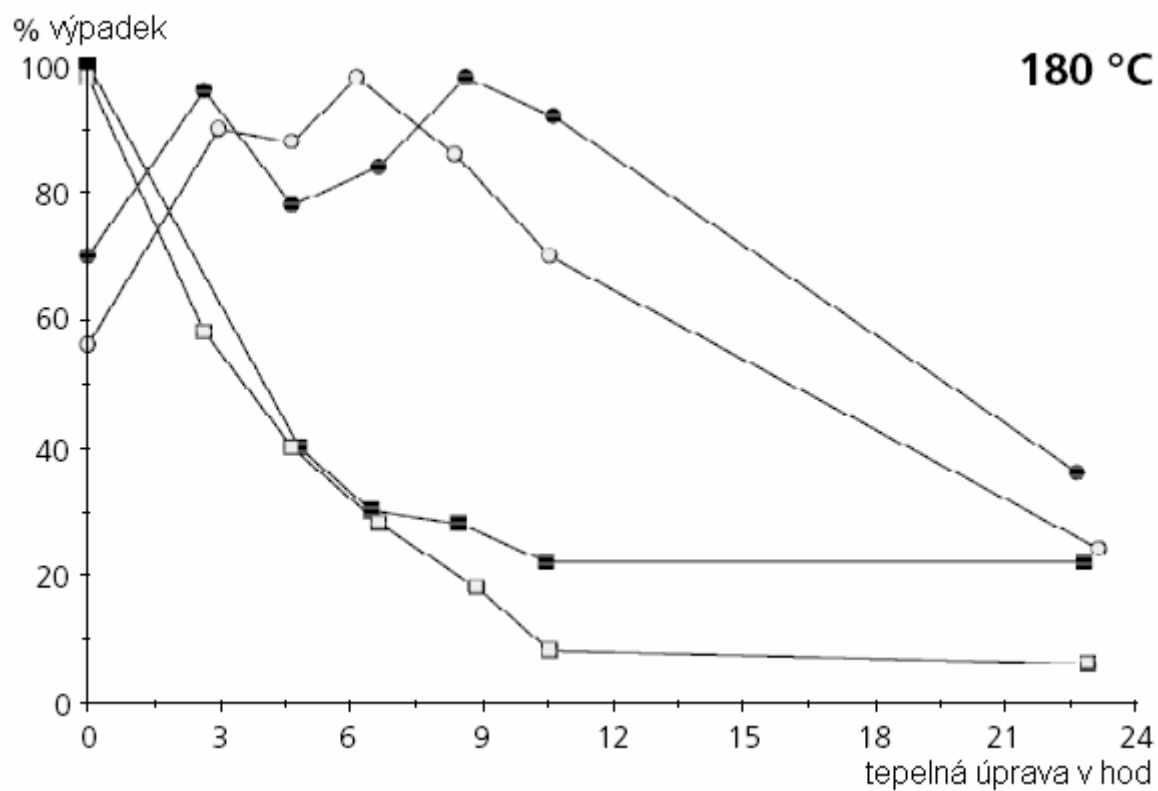
Bez tepelné úpravy prasknou při tomto testu všechny díly z kyanidového elektrolytu, 100 % výpadek.

#### 4.5.2 Vyhodnocení

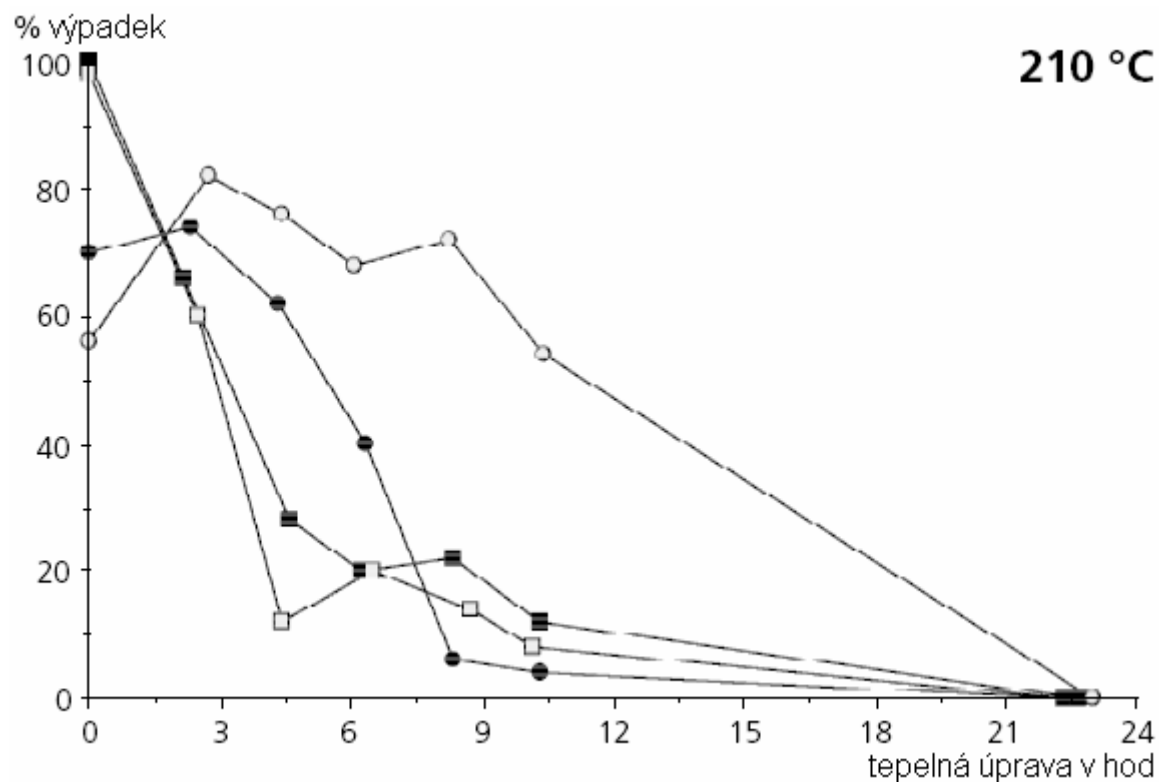
Vyšší koncentrace vodíku v alkalických elektrolytech byla experimentálně potvrzena: bez tepelné úpravy tu praskne 100 % dílů, z kyselého lesklého elektrolytu cca 70 % a z technického zinku jen cca 56 % (viz výpadky v době 0 v **obr 6**).

Při nižší teplotě úpravy byl kyanidový zinek přes stejný stupeň lesku trochu lepší. Obecně ale 180 °C nestačilo; i po 22 hod nedošlo u žádného postupu k úplnému odvodíkování, oproti tomu vedla tepelná úprava při 210 °C po 22 hod u všech postupů k žádanému úspěchu.

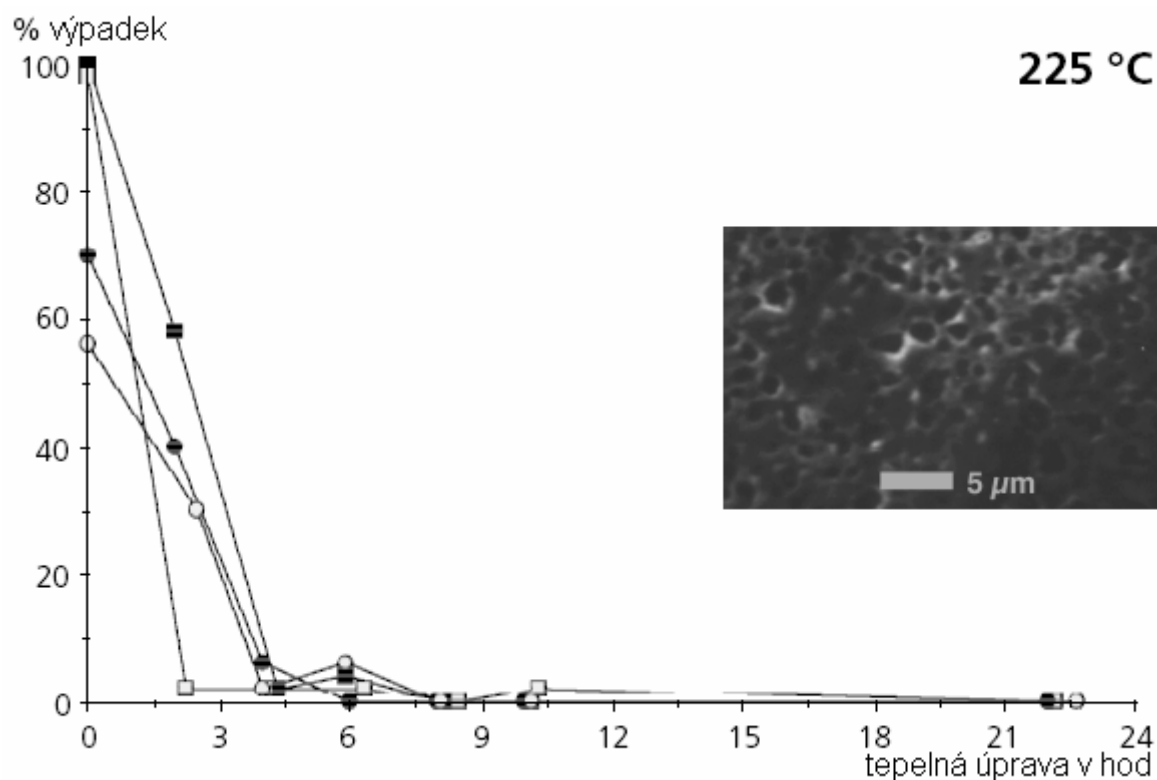
Teprve při 225 °C byly všechny díly po 6-8 hod úplně odvodíkovány. poté se ale ukázalo, že zinkové vrstvy byly silně poškozené. Vznikly póry cca  $\varnothing 1 \mu\text{m}$  (obr. 8), kterými mohl vodík sice snadno unikat, které ale nejsou tolerovatelné.



**Obr. 6:** Při 180 °C jsou alkalické elektrolyty lepší než slabě kyselé, všechny čtyři nejsou ale dostatečně difuzibilní.  
 ■ 19 µm bezkyanidový alkalický lesklý zinek      □ 19 µm kyanidový lesklý zinek  
 ● 17 µm slabě kyselý lesklý zinek                      ● 17 µm slabě kyselý matný zinek



**Obr. 6:** Při 210 °C se efúzní chování vyrovnává; všechny čtyři postupy vyžadují značně víc než 10 hod, než výpadky klesnou na 0.



**Obr. 8:** Při 225 °C jsou vrstvy zinku vypuzovaným vodíkem perforovány. Výpadky jdou sice v krátké době na 0, vrstvy zinku jsou ale silně poškozeny (REM snímek).

Teplota 225 °C je tudíž pro tepelnou úpravu příliš vysoká. Při 210 °C stačí pro tři lesklé zinkovací postupy doba tepelné úpravy cca 12 hod. Matný zinkovací postup je zcela nevyhovující. Obecně se ukázalo, že difuzibilita lesklého zinku je lepší než matného zinku. Kalené díly by měly tedy být leskle zinkovány a minimálně 10 až 12 hod při 215 °C tepelně upravovány.

## 5 Shrnutí

Také zinkování vysokopevnostních dílů se dá bezpečně provést. Z výše uvedených zkoušek se dají odvodit následující podmínky a doporučení:

- Povrch kalených dílů musí být bez oleje a karbonu a tím umožnit krátké doby moření a celkem šetrnější zpracování.
- Musí se použít vhodné inhibované mořící a odmašťovací přípravky; **SurTec 424** je pro tento účel optimalizován. Doba moření by přesto neměla přesáhnout 5 min.

- Katodické odmašťování se musí zcela vypustit.
- Neexistuje nutnost pro určitý typ elektrolytu; všechny čtyři zkoušené procesy jsou použitelné. Tendenčně byla difuzibilita kyanidického postupu nejlepší, oproti tomu byla koncentrace vodíku u slabě kyselého technického zinkovacího postupu nejmenší.
- Po zinkování by mělo být zboží zpracováno teplotně odolným modrým chromátováním (např. **SurTec 662, SurTec 664, SurTec 667**), aby byla umožněna chráněná tepelná úprava.
- Po zpracování by měla být co nejrychleji (během příštích 4 hod.) provedena tepelná úprava, aby se zabránilo poškození. Jednostupňová metoda je bezpečnější než dvoustupňová; průměrná tloušťka vrstvy by ale neměla překračovat 16-20  $\mu\text{m}$ .
- Optimální teplota pro tepelnou úpravu je pro slabě kyselé pozinkované díly 220 °C, pro alkalicky pozinkované 215 °C. Doba zpracování musí být zvolena dle druhu dílu, ale musí činit alespoň 6-8 hod.
- Nakonec se může dále žlutě, černě nebo olivově chromátovat.

Popsaným testem máme k dispozici jednoduchou zkušební metodu. Nadkritické pojistné kroužky jsou v každém ohledu (velikost dílu, tvrdost, popuštění atd.) citlivější než běžné zboží. To znamená: nemáme-li výpadky s nadkritickými zkušebními díly, nemáme jistě výpadky ani s méně kritickými díly. Jede se pak možná "moc dobře", ale zato definovaně.

Testy si může každý sám udělat. SurTec nabízí testovací sadu (kroužky, kleště, tyčinky, návod) za pořizovací cenu.