

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering

doc. Ing. Jan Suchánek, CSc.

„Mechanismy erozivního opotřebení a jejich význam pro optimální volbu
kovových materiálů v praxi“

Summary

The erosive wear due to solid particle impingement is very intensive degradation process of the surface layers of the metallic materials. The erosive behaviour of ductile materials normally involves elastic and plastic deformation and subsurface crack nucleation and propagation, unless the impact angle is so small that chips are cut.

The wear resistance is influenced by the working conditions (impact angle, impact velocity of solid particles, size, shape, hardness and amount of impinging particles) and the worn material parameters like hardness and microstructure. Present knowledge level of interaction mechanisms of impacting hard particles and surface layers of the worn material does not enable life-time prediction of machine parts working under conditions of erosive wear only on the basis of knowledge of the physical-mechanical properties and the microstructure. Therefore, it is necessary to test candidate materials experimentally.

Laboratory tests of erosion resistance of selected structural and tool steels, cast steels and chromium white cast irons and hardfacing alloys enable to select of optimum materials for definite working conditions.

There were presented practical cases of problems with low life-time of the parts of dredge pumps and coal fan mills.

Souhrn

Erozivní opotřebení způsobené dopadem pevných částic je velmi intenzivní degradační proces povrchových vrstev kovových materiálů. Eroze houževnatých materiálů obvykle zahrnuje elastickou a plastickou deformaci i tvorbu podpovrchových trhlin a jejich šíření pokud úhel nárazu není tak malý, aby se odřezávaly třísky.

Odolnost proti opotřebení je ovlivněna pracovními podmínkami (úhel nárazu, dopadová rychlost pevných částic, velikost, tvar, tvrdost a množství dopadajících částic) a parametry opotřebovávaného materiálu jako jsou tvrdost a mikrostruktura.

Současná úroveň poznatků o mechanismech interakce dopadajících tvrdých částic a povrchových vrstev opotřebovávaného materiálu neumožňuje předpověď životnosti strojních součástí, které pracují v podmínkách erozivního opotřebení, pouze na základě znalostí jejich fyzikálně-mechanických vlastností a mikrostruktury. Proto je potřebné zjišťovat odolnost proti erozivnímu opotřebení experimentálně.

Laboratorní zkoušky odolnosti proti erozivnímu opotřebení vybraných konstrukčních a nástrojových ocelí, ocelí na odlitky, bílých chromových litin a návarových slitin umožňují vybrat optimální materiály pro konkrétní provozní podmínky.

Byly presentovány praktické případy problémů s nízkou životností součástí bagrovacích čerpadel a ventilátorových mlýnů.

Klíčová slova: eroze, erozivní opotřebení, mechanismus erozivního opotřebení, intenzita erozivního opotřebení, úhel nárazu, dopadová rychlost částic, velikost částic, tvar částic, tvrdost částic, množství částic, nosné medium, erodovaný materiál, fyzikálně-mechanická vlastnost, tvrdost, mikrostruktura, karbid, matrice, volba materiálu, bagrovací čerpadlo, ventilátorový mlýn

Keywords: erosion, erosive wear, mechanism of erosive wear, intensity of erosive wear, impact angle, impact velocity of particles, particle size, particle shape, hardness of particle, carrying medium, eroded material, physical-mechanical property, hardness, microstructure, carbide, matrix, material selection, dredge pump, coal fan mill

České vysoké učení technické v Praze

Název: Mechanizmy erozivního opotřebení a jejich význam pro optimální volbu kovových materiálů v praxi

Autor: Doc.Ing. Jan Suchánek, CSc.

Počet stran: 28

Náklad: 150 výtisků

© Jan Suchánek, 2006-09-29

IBSN 80-

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Mechanizmy erozivního opotřebení.....	7
3. Teorie erozivního opotřebení.....	8
4. Vliv jednotlivých faktorů na intenzitu erozivního opotřebení.....	12
4.1. Úhel nárazu částic.....	12
4.2. Dopadová rychlost částic.....	13
4.3. Velikost částic.....	14
4.4. Tvar částic.....	14
4.5. Tvrdost částic.....	14
4.6. Množství dopadajících částic.....	15
4.7. Nosné medium.....	16
4.8. Fyzikálně-mechanické vlastnosti erodovaného materiálu.....	16
4.9. Mikrostruktura erodovaného materiálu.....	17
4.9.1. Tvrdé strukturní složky.....	17
4.9.2. Matrice.....	18
5. Volba materiálů do podmínek erozivního opotřebení částicemi.....	19
6. Vybrané případy erozivního opotřebení.....	22
6.1. Erozivní opotřebení bagrovacích čerpadel.....	22
6.2. Opotřebení ventilátorových mlýnů.....	23
7. Závěry.....	23
Literatura.....	24

1. Úvod

Životnost strojů a zařízení i jejich efektivnost v provozu výrazně ovlivňuje jejich opotřebením vyvolané nejčastěji zpracovávaným médiem, nečistotami z okolního prostředí nebo pouze interakcí funkčních povrchů v relativním pohybu. Podle dlouholetých zkušeností je opotřebením strojů a tím i jejich životnost ovlivněna 3 hlavními skupinami příčin:

- koncepcí a konstrukcí stroje nebo strojního zařízení, včetně volby materiálu,
- kvalitou výroby,
- zpracovávaným materiálem a podmínkami provozu stroje.

Lze odhadnout, že každá z vyjmenovaných skupin příčin se podílí na opotřebením strojů a strojních zařízení zhruba z 1/3, i když v jednotlivých případech se vyskytují výrazné odchylky, ovlivněné konkrétním zpracovávaným materiálem, provozem či jinou příčinou.

V řadě technologických procesů je častou příčinou poruch funkčních součástí strojního zařízení jejich opotřebením, vyvolané účinkem částic. Tyto částice mohou působit na povrch součástí abrazívně nebo erozívně v závislosti na vnějších podmínkách procesu opotřebením.

Typickými příklady erozívního opotřebením je poškozování lopatek spalovacích a parních turbin, potrubních systémů (zvláště kolen a armatur), čerpadel, vodních turbin, zařízení na zpracování polymerů a zařízení na výrobu syntetických paliv.

Erozívní mechanismy se též využívají v technologických aplikacích jako je úprava povrchu tryskáním a řezáním materiálů vodním paprskem s částicemi.

Erozívní opotřebením je trvale nežádoucí změna povrchu a rozměrů, způsobená vzájemným působením funkčního povrchu a opotřebujícího média. Projevuje se odstraňováním částic z opotřebujícího povrchu mechanickými účinky, popř. doprovázenými i jinými vlivy, např. chemickými, elektrochemickými, elektrickými a pod.

Erozívní opotřebením může být vyvoláno:

- a) částicemi nesenými proudem kapaliny
- b) částicemi nesenými proudem plynu
- c) proudem kapaliny, kapek, páry nebo plynu.

Proces erozívního opotřebením částicemi je složitý a komplikovaný jev, který je ovlivňován řadou faktorů. Podle Vocela [1] tyto faktory lze rozdělit do 3 skupin:

- podmínky nárazu - úhel nárazu, dopadová rychlost částic apod.
- charakteristiky směsi média a částic - velikost, tvar, druh a tvrdost částic, druh a teplota nosného média, jeho chemický účinek na povrchové vrstvy erodovaného materiálu, množství a rozložení částic v proudu média.
- charakteristiky erodovaného materiálu - fyzikálně-mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost a pod.) a jeho makro- i mikrostruktura.

Z uvedeného výčtu vyplývá značná složitost a obtížnost teoretického rozboru celé problematiky erozivního opotřebení.

2. Mechanizmy erozivního opotřebení

Na dopadající částici působí v okamžiku kontaktu s erodovaným povrchem řada sil. Sousední částice mohou působit kontaktními silami, proudící medium unáší částici podél povrchu, ale rozhodující silový účinek je hlavně dán bržděním částice z počáteční dopadové rychlosti. Dopad částic způsobuje časově závislou povrchovou deformaci, která vede k šíření podélných i příčných elastických vln do materiálu a Rayleighových vln podél povrchu materiálu [2]. Amplituda povrchových vln po dopadech částic je pouze 10^{-9} – 10^{-7} m. Energie přenesená dopadajícími částicemi do povrchové vrstvy erodovaného materiálu způsobuje její porušování.

Mechanizmy erozivního opotřebení mohou zahrnovat jak plastickou deformaci, tak křehký lom. Při erozivním opotřebení kovů obvykle dochází k plastické deformaci, kdežto křehčí materiály se opotřebovávají plastickou deformací nebo lomem v závislosti na dopadových podmínkách.

Při dopadu částic na povrch kovových materiálů v závislosti na jejich vlastnostech, dopadové rychlosti, úhlu nárazu, tvaru a velikosti částic i okolního prostředí mohou nastat tyto procesy [3]:

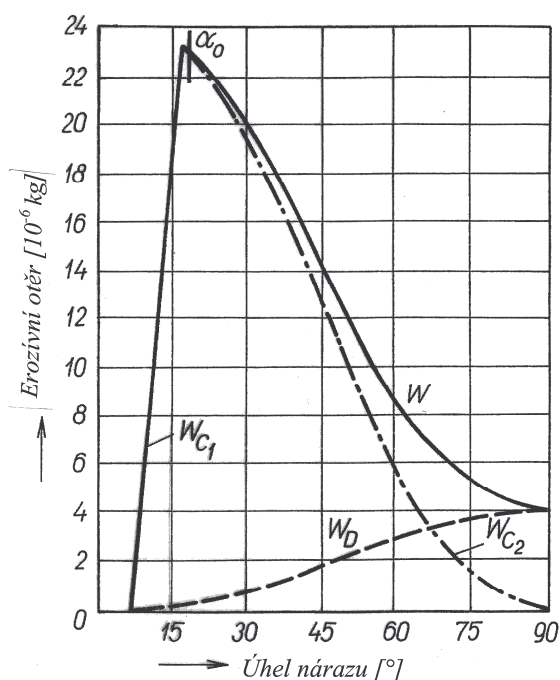
1. Částice se může roztříštit při dopadu, když je povrch erodovaného materiálu tvrdý.
2. Částice může řezat povrch a vytvářet třísku pokud úhel nárazu je velmi malý nebo částice je ostrohranná.
3. Částice může způsobit deformaci povrchu, vnikat do povrchových vrstev, vytvářet a podporovat šíření podpovrchových trhlin mechanismy velmi podobnými mechanismům delaminačního opotřebení. Trhliny jsou orientované kolmo k směru dopadu a rovnoběžně se směrem plastické deformace materiálu. To ukazuje, že se jedná o trhliny způsobené smykovou deformací podobné trhlinám pozorovaným při delaminačním opotřebení [3]. Podpovrchové trhliny se vyskytují v určité hloubce pod povrchem. Nukleace těchto trhlin obvykle nenastává pod povrchem oblasti dopadu, protože zde působí vysoký hydrostatický tlak. Tato situace pravděpodobně nastává při velkých dopadových úhlech.
4. Při středním dopadovým úhlu nastává intenzivní plastická deformace a částečné vytlačování materiálu případně se vytváří třísky.
5. Při kolmém dopadu částic dochází k tvorbě kráterů obklopených valem vytlačeného materiálu. Podle Hutchingse [4] interakce erozivní částice s povrchem materiálu zahrnuje vznik vysoké lokální teploty a tvorbu adiabatického smykového pásma. Při vysokých rychlostech dopadu dochází až k lokálnímu natavení materiálu.

3. Teorie erozivního opotřebení

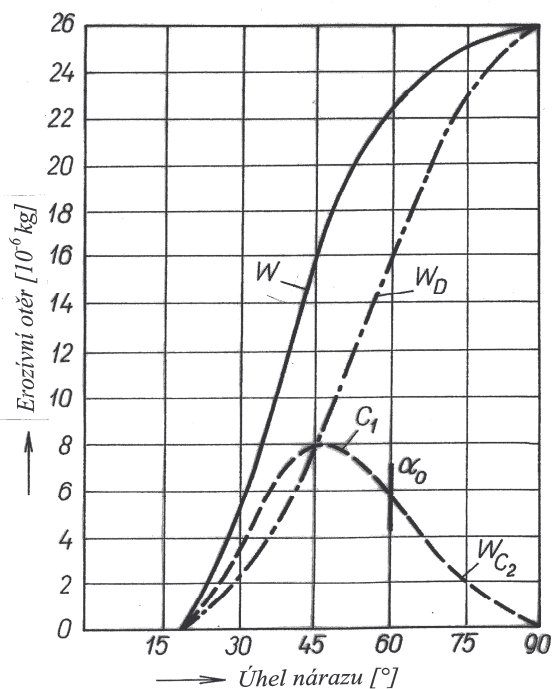
Významným přínosem pro teoretické a praktické řešení problémů s erozivním opotřebením byly práce Wellingera [5], který rozlišil 2 základní mechanismy účinku částic na povrch materiálu – deformační a rýhovací. Deformační mechanismus, který převládá při úhlech nárazu α blízkých 90° , má charakter únavového porušování povrchových vrstev erodovaného materiálu. Při vysoké energii dopadajících částic však může docházet v plastické deformaci a k porušení materiálu již při jednotlivém dopadu.

Rýhovací mechanismus působí hlavně při velkých dopadových rychlostech a malých úhlech nárazu. Při malých dopadových rychlostech rozhodující roli má postupné vyčerpání deformační schopnosti materiálu. Modely založené na únavovém porušování, kdy materiál může být odstraněn pokud dosáhne kritické deformace, byly navrženy Hutchingsem [6].

Experimentálně byly zjištěny značné rozdíly v průběhu erozivního opotřebení u houževnatých materiálů (např. čisté kovy) a u křehkých materiálů (např. čedič, sklo). Typické průběhy erozivního otěru W v závislosti na úhlu nárazu α jsou na obr. 1 a 2.



Obr. 1 Závislost erozivního otěru W na úhlu nárazu α pro měkký a houževnatý materiál



Obr. 2 Závislost erozivního otěru W na úhlu nárazu α pro tvrdý a křehký materiál

Finnie [7] navrhl pro stanovení objemového otěru W_0 způsobeného rýhovacím mechanismem empirické rovnice

$$W_0 = \frac{M \cdot v^n \cdot \cos^2 \alpha}{6\varphi \cdot y}, \quad \text{pro } \operatorname{tg} \alpha \geq \frac{K_s}{6} \quad (1)$$

$$W_0 = \frac{M \cdot v^n}{K_s \cdot \varphi \cdot y} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K_s} \sin^2 \alpha \right), \quad \text{pro } \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{K_s}{6} \quad (2)$$

kde M – celková hmota dopadlých částic [kg]
 v – dopadová rychlost částic [ms^{-1}]
 n – exponent (podle Finnieho [7] $n = 2$, v pozdějších pracích uvádí Finnie [8] pro kovy hodnoty v rozmezí 2,05 – 2,43)
 α – úhel nárazu
 φ – poměr mezi délkou a hloubkou rýh vytvořených částicemi v materiálu
 y – horizontální složka síly mezi částicí a erodovaným materiálem [N]
 K_s – poměr vertikální a horizontální složky síly působící na povrch částice

Rovnice (1) a (2) vyhovují jen pro měkké a houževnaté materiály při malých úhlech nárazu. Při velkých úhlech nárazu byly zjištěny značné rozdíly mezi vypočtenými a experimentálně zjištěnými hodnotami. Tyto rovnice neuvažují deformační mechanismus erozivního opotřebení typický právě při velkých úhlech nárazu.

Bitter [9] odvodil pro objemový ořez způsobený deformačním mechanismem W_d při dopadu kulových částic výraz

$$W_d = \frac{1}{2} \frac{M(v \cdot \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

kde K – maximální rychlost částic, při které ještě dochází k čistě elastické deformaci erodovaného materiálu
 ε – koeficient deformačního mechanismu erozivního opotřebení (= energie potřebná na odstranění jednotkového objemu materiálu při deformačním mechanismu)

Pro erozivní ořez vyvolaný rýhovacím účinkem částic byly Bitterem [9] odvozeny vztahy:

1. Pro případ $\alpha \leq \alpha_0$

$$W_{c1} = \frac{2M \cdot C(v \cdot \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{v \cdot \sin \alpha}} \left(v \cdot \cos \alpha - \frac{c(v \cdot \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{v \cdot \sin \alpha}} \rho \right) \quad (4)$$

2. Pro případ $\alpha \geq \alpha_0$

$$W_{c2} = \frac{\frac{M}{2} [v^2 \cdot \cos^2 \alpha - K_1 (v \cdot \sin \alpha - K)^{3/2}]}{\rho} \quad (5)$$

kde α_0 – úhel nárazu, při kterém je nulová tangenciální složka rychlosti částice na konci vytvořené rýhy

$$C = \frac{0,288}{\sigma_{Kt}} \sqrt[4]{\frac{d}{\sigma_{Kt}}}$$

σ_{Kt} – mez kluzu materiálu zpevněného v procesu rýhování částicemi.

Podle Bittera [9] je blízká σ_{Pt} .

d – střední průměr částic [mm]

$$K_1 = 0,82 \sigma_{Kt}^2 \sqrt[4]{\frac{\sigma_{Kt}}{d} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} - \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}$$

ρ – koeficient rýhovacího mechanismu erozivního opotřebení (= energie potřebná na odstranění jednotkového objemu materiálu při rýhovacím mechanismu erozivního opotřebení)

Podle Bittera [9] je celkový objemový erozivní otěr dán výrazy

$$W_0 = W_{c1} + W_d \quad \text{pro } \alpha \leq \alpha_0 \quad (6)$$

$$W_0 = W_{c2} + W_d \quad \text{pro } \alpha \geq \alpha_0 \quad (7)$$

Rovnice (6) a (7) platí za předpokladu, že $V \cdot \sin \alpha \geq K$.

Neilson a Gilchrist [10,11] se pokusili zjednodušit postup při hodnocení rozsahu erozivního opotřebení na podkladě Bitterových představ. Jejich řešení je výhodné pro houževnaté materiály. Navrhli vztahy

1. Pro případ $\alpha < \alpha_0$

$$W_0 = \frac{1}{2} \frac{M \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \bar{p} \alpha}{\phi} + \frac{1}{2} \frac{M (v \cdot \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

2. Pro případ $\alpha > \alpha_0$

$$W_0 = \frac{1}{2} \frac{M \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha}{\phi} + \frac{1}{2} \frac{M (v \cdot \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

kde ϕ – kinetická energie absorbovaná povrchem na uvolnění jednotkové hmoty erodovaného materiálu při rýhovacím mechanismu
 ε – kinetická energie absorbovaná povrchem na uvolnění jednotkové hmoty erodovaného materiálu při deformačním mechanismu
 \bar{p} - konstanta

Podle Neilsona a Gilchrista [10,11] existují pro závislost $W_0 = f(\alpha)$ 3 možná řešení v oblasti úhlů $\alpha > \alpha_0$:

1. $\frac{dW_0}{d\alpha} = 0$; pak $\varepsilon = 0$ a $W_0 = \frac{1}{2} \frac{M \cdot v^2}{\phi}$, tj. W_0 nezávisí na α , jestliže

poměr $\frac{\phi}{\varepsilon} = 1$.

2. $\frac{dW_0}{d\alpha} > 1$; pak $\phi > \varepsilon$, tj. W_0 roste s rostoucím úhlem nárazu, je-li poměr $\frac{\phi}{\varepsilon} > 1$.

3. $\frac{dW_0}{d\alpha} < 1$; pak $\phi < \varepsilon$, tj. W_0 klesá s rostoucím úhlem nárazu, je-li

poměr $\frac{\phi}{\varepsilon} < 1$.

Pro oblast úhlů $\alpha < \alpha_0$ platí vztah

$$\frac{\phi}{\varepsilon} = \sin \bar{p} \alpha_{max} - \frac{\bar{p} \cdot \cos \bar{p} \alpha_{max}}{2 \operatorname{tg} \alpha_{max}} \quad (10)$$

kde α_{max} – úhel, při kterém $\frac{dW_0}{d\alpha} = 0$

Pak pro $\alpha_{max} = \alpha_0 \rightarrow \frac{\phi}{\varepsilon} = 1$, pro $\alpha_{max} < \alpha_0 \rightarrow \frac{\phi}{\varepsilon} < 1$ a pro $\alpha_{max} > \alpha_0 \rightarrow \frac{\phi}{\varepsilon} > 1$ (na křivce $W_0 = f(\alpha)$ není maximum.

Se změnou rychlosti částic se poměr $\frac{\phi}{\varepsilon}$ mění málo, avšak značný vliv na jeho velikost má změna geometrie částic.

Rovnice (1-10) obsahují empirické konstanty, ve kterých by měly být zahrnuty všechny faktory ovlivňující proces eroze jako jsou struktura částic a erodovaného materiálu nebo tvar částic. Proto se musí stanovovat experimentálně pro danou kombinaci částic a povrchu [12].

Hlavní faktory, které ovlivňují přenos energie do povrchových vrstev erodovaného materiálu jsou dopadová rychlost, tvar a tvrdost erozivních částic, tvrdost a schopnost erodovaného materiálu absorbovat kinetickou energii dopadajících částic. Všechny dosud uvedené teoretické vztahy byly odvozeny pro případ erozivního opotřebení materiálů částicemi unášenými v proudu

plynu. Pro hodnocení procesu eroze ve směsi kapaliny a částic je lze použít jen přibližně.

Kozyrev [13] pro objemový otěr W_0 při erozivním opotřebení směsí kapaliny a částic našel vztah

$$W_0 = \frac{0,168 K_K \bar{\rho}^{\frac{5}{n+2}} (P.B)^{\frac{10}{n+2}} \cdot \sin^{\frac{8-n}{n+2}} \alpha \cdot \cos \alpha}{H_m^{\frac{8}{n+2}}} \quad (11)$$

kde K_K – konstanta (poměr objemu materiálu odstraněného při dopadu částice k objemu materiálu přemístěného při plastické deformaci vyvolané dopadající částicí)

$\bar{\rho}$ - hustota částic [kgm^{-3}]

P – koncentrace částic ve směsi kapaliny a částic [kgm^{-3}]

B – objem směsi [m^3]

v – rychlost částic [ms^{-1}]

α – úhel nárazu [$^\circ$]

H_m – tvrdost erodovaného materiálu

n – konstanta (z Meyerova vztahu $F = a \cdot d^n$)

Z rovnice (11) vyplývá, že objemový otěr lineárně roste s koncentrací částic ve směsi a s dobou zkoušky. Existuje však řada údajů o existenci „kritické“ koncentrace částic. Při překročení kritické koncentrace částic intenzita erozivního opotřebení klesá [14,15].

4. Vliv jednotlivých faktorů na intenzitu erozivního opotřebení

4.1. Úhel nárazu částic

Značné rozdíly v průběhu závislosti objemového otěru W_0 na úhlu nárazu α byly zjištěny u houževnatých materiálů a u křehkých materiálů. Souvisí to se současným působením dvou mechanismů erozivního porušování - deformačního a rýhovacího [5]. Průběh závislosti $W_0 = F(\alpha)$ je však funkcí i dalších faktorů, zejména dopadové rychlosti částic, jejich tvaru i velikosti a fyzikálně mechanických vlastností erodovaného materiálu [16]. Obecně platí, že u houževnatých materiálů je maximální otěr při úhlu nárazu $20 - 40^\circ$. V případě ostrohranných nebo velmi jemných částic je maximum na závislosti $W_0 = f(\alpha)$ při menších úhlech nárazu. U tvrdých materiálů dochází k maximální intenzitě erozivního opotřebení při úhlech nárazu v rozmezí $60-80^\circ$.

Levy a Yau [17] experimentálně zjistili, že v případech směsi kapaliny a částic se docílí i u houževnatých materiálů maximální otěr při úhlu nárazu 90° , případně s další oblastí s vysokou intenzitou eroze při $40-60^\circ$ u některých slitin.

Podle Kozyreva [13] platí rovnice

$$W_0 = A_1 \cdot \sin^{\frac{8-n}{n+2}} \alpha \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

Z rovnice (12) vyplývá významný vliv n (Meyerova exponentu) erodovaného materiálu. S růstem hodnoty n se bude maximum funkce $W_0 = f(\alpha)$ posunovat k menším hodnotám úhlu nárazu α .

Úzká souvislost mezi kinetickou energií dopadajících částic a schopností materiálu akumulovat tuto energii se projevuje při erozivním opotřebení částicemi s vysokou rychlostí (200 – 250 ms⁻¹), kdy se prakticky nemusí projevit vliv odolnosti materiálu při úhlech nárazu 30-90°[18].

Při erozivním opotřebení postupně dochází k oddělování materiálu v oblasti dopadu částic, což se projeví zdrsněním povrchu. Pak úhly nárazu jednotlivých částic budou záviset na sklonu povrchu v místě jejich dopadu. Také s prohlubující erozivní „jizvou“ se budou měnit úhly nárazu, takže intenzita eroze se bude měnit.

4.2. Dopadová rychlost částic

Obecně platí, že objemový erozivní otěr je úměrný n -té mocnině dopadové rychlosti částic. Hodnota exponentu n závisí na erodovaném materiálu, na úhlu nárazu, geometrickém tvaru částic a pevnosti částic při nárazu [19]. Objemový erozivní otěr není tedy závislý pouze na kinetické energii dopadajících částic. Uplatňují se i další faktory, které ovlivňují intenzitu erozivního poškozování povrchových vrstev.

U kovů se hodnota exponentu n pohybuje podle v rozmezí 2.05 - 2.8. Např. Kaščejev [20] experimentálně zjistil závislost hmotnostního otěru ocelí na rychlosti dopadajících částic slinutého karbidu ve tvaru $W_h \sim V^{2,2}$. Goodwin [21] uvádí pro závislost objemového otěru na rychlosti dopadajících částic vztah

$$W_0 = c \cdot v^n \quad (13)$$

kde $n = 2$ pro částice o velikosti 25 μm a $n = 2,3$ pro částice o velikosti 125 μm a větší.

Podle Hutchingse [4] koeficient n leží typicky mezi 2,3 – 3 a často má hodnotu okolo 2,4 u houževnatých kovů při úhlech nárazu, kdy dochází k maximální intenzitě erozivního opotřebení (20 – 30°). Uetz [22] však udává, že v případech, kdy tvrdost částic je větší než tvrdost erodovaného materiálu ($H_m < H_a$), hodnota exponentu n je v rozmezí 2 – 2,6, kdežto při $H_m > H_a$ exponent n nabývá hodnot menších než 2. To odpovídá výsledkům docíleným při našich zkouškách v SVÚM [23,24,25]. U kalené oceli 19 436 byl exponent $n = 2,12$ při úhlu nárazu $\alpha = 15^\circ$ a $n = 2,35$ při $\alpha = 45-75^\circ$. Obdobné údaje o exponentu n

publikoval Suh [3]. Pro houževnaté kovy udává hodnotu $n = 1,7 - 2,8$ a pro křehké materiály je n v rozmezí $1,4 - 5,1$. Rychlosti odražených částic jsou $5 - 20\%$ původní dopadové rychlosti, takže kinetická energie částic přenesená do povrchových vrstev je $96 - 99,8\%$ jejich původní energie [3].

Tilly [15] předpokládá, že hodnota exponentu $n > 2$ je způsobena sekundární erozí vyvolanou úlomky částic porušených při dopadu na erodovaný povrch.

4.3. Velikost částic

S rostoucí velikostí dopadajících částic lineárně stoupá jejich kinetická energie a proto bude růst i intenzita erozivního opotřebení. Obdobně jako u abrazivního opotřebení existuje „kritická“ velikost částic ($d = 0,1 - 0,2$ mm). Po dosažení kritické velikosti částic objemový erozivní otěr již nezávisí na velikosti částic. S rostoucí dopadovou rychlostí částic se jejich kritická velikost zmenšuje.

Experimentálně bylo též zjištěno, že erozi povrchu materiálu vyvolávají částice, které jsou větší než určitá mezná velikost [26]. Velmi malé částice jsou totiž strhávány proudícím plynem nebo kapalinou, které obtékají povrch součástí a proto dopadají na exponovaný povrch při menším úhlu nárazu než větší částice s větší setrvačnou hmotou. V řadě případů ani nedochází k jejich interakci s povrchem součástí.

4.4. Tvar erozivních částic

V rovnicích (1-10) se přímo neuvažuje s vlivem tvaru částic na intenzitu erozivního opotřebení. Bylo zjištěno, že větší intenzita erozivního otěru je způsobena částicemi s větším počtem hran a s jejich malým poloměrem zaoblení. Ostrohranné částice potřebují menší kinetickou energii pro vyvolání plastické deformace povrchových vrstev erodovaného materiálu než sférické částice. Např. při našich zkouškách byl objemový otěr žíhané oceli 12 050 ~ 18,3krát větší při použití ostrohranné litinové drti než při použití ocelových kuliček.

Při dopadech částic na erodovaný povrch dochází ke snižování jejich erozivní schopnosti otupováním hran a výstupků a při vysokých dopadových rychlostech k porušování jejich celistvosti.

Stanovení tvarového součinitele u jednotlivých částic je velmi obtížné a není s ním uvažováno v empirických rovnicích.

4.5. Tvrdost erozivních částic

Proces erozivního opotřebení je ovlivňován tvrdostí erozivních částic. S rostoucí tvrdostí a pevností částic roste intenzita porušování erodovaného

povrchu. Podle Goodwina [21] mezi tvrdostí částic průmyslových prachů a intenzitou erozivního opotřebení $\frac{W_h}{M}$ platí vztah

$$\frac{W_h}{M} = 10^{-7} \cdot H^{2,3} \quad (14)$$

Poškozování povrchu způsobují i částice s nižší tvrdostí než je tvrdost erodovaného materiálu. Na rozdíl od abrazivního opotřebení při erozi rozhodující roli hraje kinetická energie dopadajících částic.

Kromě tvrdosti částic mají významný vliv i jejich mineralogické vlastnosti – štěpitelnost, houževnatost apod.

4.6. Množství dopadajících částic

Mezi erozivním otěrem a počtem dopadajících částic se obvykle předpokládá lineární závislost. Objemový úbytek erodovaného materiálu proto roste s rostoucí koncentrací částic v proudícím mediu a s dobou jejich působení, nemění-li se další podmínky procesu eroze. Existuje však počáteční fáze procesu erozivního opotřebení, kdy se mění intenzita erozivního opotřebení a až po dosažení určité hranice, která je závislá na dopadové rychlosti částic a jejich úhlu nárazu, je intenzita procesu erozivního opotřebení ustálená [27]. Souvisí to s inkubační dobou, kdy dochází k postupné kumulaci plastické deformace a u měkčích materiálů i k zabudování částic do povrchové vrstvy.

Experimentální výsledky ukazují, že existuje kritická koncentrace částic v proudící směsi částic a nosného media. Při vyšší koncentraci částic dochází k vzájemné interakci dopadajících a odražených částic, což může vést k poklesu intenzity erozivního porušování povrchu součástí.

Velmi negativní účinek na intenzitu erozivního opotřebení má náhlá změna směru proudění směsi nosného media a částic, která způsobuje lokální zvýšení koncentrace částic. V daném místě dochází k vyšší intenzitě procesu eroze, což může vést u kolen potrubí na pneumatickou nebo hydraulickou dopravu materiálů až k jejich perforaci.

4.7. Nosné medium

Nosné medium výrazně ovlivňuje proces erozivního opotřebení ve dvou směrech. Především chemicky reaguje s erodovaným povrchem materiálu a vytváří povlaky oxidů či jiných produktů chemické reakce. Odolnost těchto povlaků proti erozivnímu působení částic je obvykle nižší než základního materiálu a proto intenzita korozně-erozivního opotřebení je vyšší než při erozi částicemi bez chemického působení prostředí [28]. Teplota erodovaných materiálů má výrazný vliv jak na intenzitu chemických reakcí, tak na vlastnosti erodovaných materiálů. Např. s rostoucí teplotou do 400°C intenzita erozivního

opotřebení uhlíkových a nízkolegovaných ocelí klesá a při dalším růstu teploty roste, což souvisí se změnou jejich fyzikálně-mechanických vlastností s teplotou [29,30]. U vysokolegovaných ocelí však intenzita erozivního opotřebení klesá monotonně s rostoucí teplotou do 400°C [3].

Proudící medium, zejména s vyšší hustotou, výrazně mění trajektorie menších částic v blízkosti erodovaného povrchu. Úhly nárazu těchto jsou pak obvykle menší, než u větších částic, u kterých se projevuje setrvačnost. Kromě toho jsou částice bržděny účinkem nosného media, které je nutné vytlačit z místa kontaktu. Kozyrev [13] odvodil pro závislost okamžité rychlosti v při dopadu na počáteční rychlosti částic v_0 pro různě hmotné částice a různou viskozitu nosné kapaliny η vztah

$$v^2 = v_0^2 + \left(\frac{g \cdot \eta \cdot R^4}{2d^3 \cdot \rho \cdot h^2} \right)^2 - \frac{g \cdot v_0 \cdot \eta \cdot R^4}{d^3 \cdot \rho \cdot h^2} \quad (15)$$

kde R – poloměr vtisku částice
 h – vzdálenost částice od povrchu
 ρ – měrná hmotnost částice

4.8. Fyzikálně-mechanické vlastnosti erodovaného materiálu

Všechny teoretické modely předvídají, že velikost erozivního otěru způsobeného mechanizmy, které zahrnují plastickou deformaci, by měla být nepřímo úměrná tvrdosti erodovaného materiálu. Např. Kozyrev [13] pro úhel nárazu $\alpha = 10^\circ$ uvádí empirický vztah

$$A_0 = a + b \cdot H_m^{1,15} \quad (16)$$

Kde A_0 – množství částic potřebných pro oddělení jednotkového objemu erodovaného materiálu
 a, b – konstanty
 H_m – tvrdost erodovaného materiálu

Také Finnie a kol. [8] našli při experimentech ($v = 77 \text{ ms}^{-1}$, $\alpha = 20^\circ$) zhruba lineární závislost mezi intenzitou erozivního opotřebení a tvrdostí u čistých kovů. Head a Haar [31] zjistili při malých úhlech nárazu, že odolnost materiálu proti erozivnímu opotřebení je úměrná tvrdosti. Při kolmých dopadech částic je odolnost materiálu proti erozivnímu opotřebení je úměrná deformační práci, tj. ploše pod křivkou v diagramu napětí-deformace [31].

Kozyrev [13] při kolmém dopadu částic však našel lineární závislost objemového erozivního otěru a tvrdostí.

$$W_0 = \frac{A_2}{\frac{5}{H_m^{n+2}}} \quad (17)$$

Kovy se stejnou tvrdostí, ale s různou hodnotou n budou mít za stejných zkušebních podmínek rozdílné hodnoty W_0 .

Podle Tillyho [15] však neexistuje obecná korelace mezi tvrdostí a odolností materiálu proti erozivnímu opotřebení. Základní příčinou je odlišný charakter deformace povrchové vrstvy materiálu při dopadu reálných částic a deformace vyvolané indentorem při měření tvrdosti vnikacími metodami.

Vliv tvrdosti neopotřebeného povrchu na poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení byl studován experimentálně na chromvanadových nástrojových ocelích 19 571 a 19581 kalených z teplot 950°C až 1200°C. Přes výrazný pokles tvrdosti (19 571 – 289 HV a 19 581 – 375 HV), který souvisí s rozpouštěním karbidů a růstem podílu zbytkového austenitu ve struktuře zkoušených ocelí snížení poměrné odolnosti proti erozivnímu opotřebení bylo poměrně malé [32].

Existuje korelace mezi odolností proti erozivnímu opotřebení a pevností krystalové mřížky, pevností hranic zrn erodovaného materiálu a stupněm poruch ve struktuře, na kterých závisí využití meziatomárních vazebných sil.

4.9. Mikrostruktura erodovaného materiálu

Pro součásti, které se intenzivně opotřebovávají dopadajícími částicemi, se často používají slitiny na bázi Fe-C a proto se budeme zabývat vlivy mikrostruktury na odolnost proti erozivnímu opotřebení u ocelí.

Mikrostruktura ocelí a litin je obvykle tvořena heterogenní směsí fází s různými fyzikálně-mechanickými charakteristikami. Tyto složky mají rozdílnou odolnost proti erozivnímu účinku částic. Přitom se musí vzít do úvahy i další faktory procesu erozivního opotřebení jako jsou dopadová rychlost, úhel nárazu a pod.

Vlastní proces erozivního opotřebení povrchových vrstev v závislosti na energii dopadajících částic zahrnuje elastickou deformaci, plastickou deformaci a oddělování třísek materiálu. Pokud při dopadu částic nastává pouze elastická deformace, pak proces porušování povrchových vrstev má charakter vysokocyklové kontaktní únavy. Intenzita erozivního opotřebení je přitom velmi malá.

Za vysokých teplot nebo v korozním prostředí bude probíhat kombinovaný proces korozně-erozivního opotřebení, který má obvykle vyšší intenzitu porušování povrchových vrstev. Vrstvy korozních produktů mají odlišné fyzikálně-mechanické charakteristiky než základní materiál.

Částice s vyšší kinetickou energií, které při dopadu vyvolávají lokální plastickou deformaci, způsobují zvýšenou intenzitu erozivního porušování

povrchu. Opakovaným dopadem částic se postupně vyčerpá deformační schopnost materiálu a dojde k oddělování částic otěru křehkým lomem.

Při vysoké dopadové energii částic vzniká okamžitě porušení povrchových vrstev, protože kinetická energie částic pohlcená erodovaným materiálem vede k vyčerpání jeho deformačních schopností.

4.9.1. Tvrdé strukturní složky

Odolnost proti erozivnímu opotřebení závisí na tvrdosti, tvaru, velikosti a množství tvrdých strukturních složek a jejich rozložení v základní kovové hmotě. Obecně platí, že rostoucí podíl karbidů či jiných tvrdých fází má příznivý vliv na odolnost proti erozivnímu opotřebení. Karbidy mají velký význam především jako překážky proti vnikání erozivních částic do povrchu materiálu. Při své vysoké tvrdosti mohou karbidy snadno otupovat řezné hrany a hroty částic. Kromě podílu karbidů jsou důležitými faktory i typ karbidické fáze a velikost karbidických částic. Podle Garbera [33] karbidy typu M_7C_3 odolávají lépe erozivnímu účinku částic než karbidy typu M_3C . Speciální karbidy typu MC však nepůsobí příznivě na odolnost proti erozivnímu opotřebení částicemi.

Pro dosažení vyšší odolnosti proti erozivnímu opotřebení je příznivá vysoká dispersnost karbidů. Velké karbidy se při erozivním účinku částic snadno rozrušují a vylamují.

4.9.2. Matrice

Z dostupných literárních údajů vyplývá, že nejnižší odolnost proti erozivnímu opotřebení mají feritické struktury. Nalegování feritu karbidotvornými prvky (Cr, W, V) se podle Grinbergové [34] neprojeví pozitivně růstem odolnosti proti erozivnímu opotřebení.

S rostoucím podílem perlitu ve struktuře stoupá odolnost proti erozivnímu opotřebení, avšak důležitou roli mají parametry eroze. Při velkých dopadových rychlostech bude efekt rostoucího podílu perlitu na zvýšení otěruvzdornosti poměrně malý.

Oceli a litiny s martenzitickou základní strukturou mají vyšší odolnost proti opotřebení než perlitické materiály obdobného chemického složení. Přítomnost perlitu nebo bainitu ve struktuře martenzitických bílých litin se projeví zhoršením jejich odolnosti proti erozivnímu účinku částic. U ocelí a litin s martenzitickou mikrostrukturou je důležitý obsah uhlíku a legujících prvků v základní hmotě.

Přítomnost karbidů v martenzitické základní hmotě se projeví dalším zvýšením odolnosti proti erozivnímu opotřebení. Největší odolnost proti erozivnímu opotřebení mají bílé chromové litiny s martenzitickou, případně martenziticko-austenitickou maticí, která obsahuje tvrdé karbidy typu M_7C_3 .

U chromových bílých litin typ i morfologie karbidů jsou dány podmínkami krystalizace a chemickým složením. Tepelným zpracováním lze měnit pouze kovovou matici, případně morfologií sekundárních karbidů.

Vysokou odolnost proti erozivnímu opotřebení částicemi mají též chromové ledeburitické oceli. Jejich mikrostruktura je závislá na chemickém složení, na podmínkách tváření a na tepelném zpracování. Lze u nich měnit typ, morfologii i podíl jednotlivých strukturních složek, což má velký vliv na intenzitu procesu erozivního opotřebení částicemi.

Při kalení ledeburitických ocelí se vyskytuje ve struktuře zbytkový austenit, který se při interakci s erozivními částicemi může transformovat na martenzit. Jeho vliv na odolnost proti erozivnímu opotřebení závisí na energii dopadajících částic. Při dopadové rychlosti částic $\sim 20 \text{ ms}^{-1}$ bylo zjištěno, že poměrná odolnost proti erozivnímu opotřebení s rostoucím podílem zbytkového austenitu mírně klesá [35]. U ledeburitických ocelí kalených z vysokých teplot dochází současně k poklesu podílu karbidů, což může být hlavní příčinou poklesu odolnosti proti erozivnímu opotřebení.

Popouštění kalených ocelí mění jejich odolnost proti erozivnímu opotřebení. Naše experimenty s různými druhy ocelí prokázaly, že u eutektoidní uhlíkové oceli výrazný pokles hodnot poměrné odolnosti proti erozivnímu opotřebení ψ_e nastal již při popouštění na $150^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzduch}$, kdežto ledeburitické chromové oceli a bílé chromové litiny je možné popouštět na $200\text{--}250^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzduch}$ bez výraznějšího poklesu hodnot ψ_e .

Uvedené poznatky o vlivu strukturních faktorů platí pouze v případě eroze částicemi s nižšími kinetickými energiemi. Při dopadech částic s vysokou kinetickou energií může být vliv strukturních faktorů málo významný.

5. Volba materiálů do podmínek erozivního opotřebení částicemi

Při řešení konkrétních problémů s nízkou životností součástí strojů a strojních zařízení způsobených intenzivním erozivním opotřebením, není ve většině případů možno dosáhnout optimálního řešení jen změnou materiálu exponované součásti. Je nutné uvažovat i o konstrukčních změnách, které umožní výrazné snížení intenzity opotřebení snížením dopadové rychlosti částic, zmenšením jejich množství, změnou úhlu nárazu částic a pod. Konstrukční úpravy jsou mnohdy neekonomičtějším způsobem řešení malé životnosti opotřebovávaných částí. Při vlastní volbě materiálů se musí zvažovat jak technické, tak ekonomické aspekty celého řešení. Cena materiálu je často jen malou částí pořizovacích a provozních nákladů.

Z předchozího přehledu poznatků o chování různých materiálů v podmínkách erozivního opotřebení částicemi vyplývá, že v principu lze používané materiály rozdělit na dvě typické skupiny. První skupina reprezentuje měkké a houževnaté materiály, které je účelné používat pouze při velkých úhlech nárazu. Při menších dopadových rychlostech se osvědčily pryže a některé plasty s malým modulem pružnosti, které jsou schopny dostatečně utlumit kinetickou energii částic. Do druhé skupiny patří tvrdé materiály (kalené a nízkopopuštěné oceli a bílé litiny, tvrdé návary, slinuté karbidy), které dobře odolávají erozi částicemi při malých úhlech nárazu. Příznivě se projevuje

odolnost povrchových vrstev proti vnikání částic a odolnost proti jejich rýhovacímu účinku.

Predikce životnosti strojů a strojních zařízení pracujících v podmínkách intenzivního erozivního opotřebení částicemi na podkladě empirických vztahů odvozených často za specifických podmínek je velmi obtížná. Proto se při výběru materiálů nejčastěji vychází z hodnot odolnosti proti erozivnímu opotřebení zjišťovaných laboratorními nebo provozními zkouškami.

V podmínkách erozivního opotřebení se používá velké množství různých konstrukčních a nástrojových ocelí, bílých litin, návarových a nástřikových materiálů. Poměrná odolnosti proti erozivnímu opotřebení ψ_e , která je dána poměrem objemového otěru etalonového materiálu (obvykle žíhaná nízkouhlíková ocel s tvrdostí 95 – 105 HV) a zkoušeného materiálu kovových materiálů je shrnuta v tab. 1–3 [32,35,36,37,38]. Zkoušky se uskutečnily za stejných zkušebních podmínek (viz tab. 1).

Tab. 1 Poměrná odolnost proti erozivnímu opotřebení konstrukčních a nástrojových ocelí
Parametry zkoušek – tryskáčské zařízení EO-2, $\alpha = 45^\circ$, $v = 21 \text{ ms}^{-1}$, doba zkoušky – 600 s, částice – křemenný písek ($d_{50} = 0,43 \text{ mm}$), koncentrace – 0,75 kg písku + 55 kg vody

Druh oceli	Tepelné zpracování	Tvrdost [HV]	ψ_e [1]
12 014	žíháno	100	1.0
12 050	normalizačně žíháno	200	1.32
12 050	kaleno $810^\circ\text{C}/\text{voda}$ + popuštěno $200^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	618	1.94
14 209	kaleno $820^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $160^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	723	2.55
14 260	kaleno $820^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $400^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	548	2.09
17 618	austenitizováno $1050^\circ\text{C}/1\text{h}/\text{voda}$	219	1.93
19 083	kaleno $820^\circ\text{C}/\text{voda}$ + popuštěno $200^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	646	2.05
19 152	kaleno $790^\circ\text{C}/\text{voda}$ + popuštěno $150^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	790	2.1
19 191	kaleno $780^\circ\text{C}/\text{voda}$ + popuštěno $200^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	773	2.0
19 312	kaleno $780^\circ\text{C}/\text{voda}$ + popuštěno $200^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	713	2.41
19 436	kaleno $950^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $150^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	797	3.56
19 436	kaleno $1050^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $500^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	743	3.23
19 572	kaleno $1000^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $150^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	804	3.58
19 581	kaleno $950^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $150^\circ\text{C}/2\text{h}/\text{vzd.}$	770	3.21
19 810	kaleno $1240^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $560^\circ\text{C}/3 \times 3/4\text{h}/\text{vzd.}$	882	2.83
19 811	kaleno $1240^\circ\text{C}/\text{olej}$ + popuštěno $560^\circ\text{C}/3 \times 3/4\text{h}/\text{vzd.}$	852	2.71

Tab. 2 Poměrná odolnost proti erozivnímu opotřebení ocelí na odlitky a litin

Označení materiálu	Tepelné zpracování	Tvrдость	ψ_e [1]
42 2709	žiháno 890 ⁰ C/2h/vzd.	181 HV	1.35
42 2709	kaleno 890 ⁰ C/voda + popušt. 630 ⁰ C/2h/voda	244 HV	1.38
42 2736	žiháno 840-850 ⁰ C/2h/vzd.	266 HV	1.72
42 2739	žiháno 840 ⁰ C/2h/vzd.	240 HV	1.56
42 2904	žiháno 930 ⁰ C/1h/vzd. + popuštěno 700 ⁰ C/vzd.	229 HV	1.52
42 2920	austenitizováno 1070 ⁰ C/voda	209 HB	2.13
42 2921	austenitizováno 1070 ⁰ C/voda	224 HB	2.25
Cr15Mo2	žiháno 900 ⁰ C/4h/pec	34.7 HRC	2.20
Cr15Mo2	kaleno 950 ⁰ C/1h/vzd. + popušt. 200 ⁰ C/2h/vzd.	65 HRC	5.95
Cr27	žiháno 900 ⁰ C/4h/pec	33.5 HRC	2.21
Cr27	kaleno 1100 ⁰ C/1h/vzd. + popušt. 200 ⁰ C/2h/vzd.	61.1 HRC	5.96
Ni-Hard 2	žiháno 275 ⁰ C/8h/vzd.	675 HV	3.22

Tab. 3 Poměrná odolnost proti erozivnímu opotřebení návarů

Návar	Směrné chemické složení návarové slitiny	Tvrдость [HV]	ψ_e [1]
A	0,4 C; 1,6 Mn	607	1.79
B	0,1 C; 0,9 Mn; 3 Cr	351	1.73
C	0,2 C; 0,9 Mn; 2 Cr; 0,5 Mo; 0,5 V	407	1.64
D	3 C; 2,3 Mn; 2,5 Si; 3 Cr; 3,5 W; 1 V; 0,3 Cu	832	2.83
E	0,15 C; 0,6 Mn; 0,5 Si; 14,5 Cr	498	2.00
F	0,2 C; 0,6 Mn; 0,4 Si; 13 Cr	496	1.86
G	2 C; 0,3 Mn; 0,5 Si; 12 Cr	776	2.58
H	3,5 C; 0,8 Mn; 0,8 Si; 27,5 Cr	738	4.30
I	3,5 C; 0,8 Mn; 2 Si; 25 Cr; 0,5 B	861	4.13
J	1,66 C; 2,11 Mn; 1,65 Si; 7,21 Cr; 0,22 Ti	736	2.00
K	0,52 C; 0,43 Mn; 1,58 Si; 3,56 Cr; 0,52 B	443	1.83
L	0,9 C; 2,2 Si; 7 Cr; 2,3 Ni; 2,5 B; 2,5 Ti	931	3.01

Z tvářených konstrukčních a nástrojových ocelí mají vysoké hodnoty poměrné odolnosti proti erozivnímu opotřebení kalené a nízkopopuštěné chromové ledeburitické oceli 19 436 a 19 572, což souvisí s jejich mikrostrukturou složenou z tvrdých komplexních karbidů M_7C_3 a martenzitické matrice.

Bílá chromová litina Cr27 a bílá chromomolybdenová litina Cr15Mo2 mají podstatně vyšší podíl karbidické fáze než chromové ledeburitické oceli a

proto mají vyšší hodnoty ψ_e než chromové ledeburitické oceli. Také tvrdé návarové slitiny s chemickým složením obdobným jako bílé chromové litiny mají vysokou odolnost proti erozivnímu opotřebení částicemi.

Slitiny neželezných kovů obvykle mají odolnost proti erozivnímu účinku částic podstatně nižší než oceli s nízkým obsahem uhlíku. Jejich otěruvzdornost lze však zvýšit vhodnou povrchovou úpravou.

6. Vybrané případy erozivního opotřebení

6.1. Erozivní opotřebení bagrovacích čerpadel

V elektrárně Oslavany se pro dopravu popelovin používala hydraulická doprava s bagrovacími čerpadly typu 250 NBB s dvoukomorovými oběžnými koly. Kola se původně odlévala z austenitické manganové oceli (1.2 % C, 12 % Mn), která se běžně používá v podmínkách abrazivního opotřebení s rázy. Hydraulické podmínky v bagrovacím čerpadle však nevytvářejí předpoklady pro zpevňování povrchu součástí. Částice klouzají po povrchu, přičemž dominantním mechanismem porušování materiálu je mikrořezání. Nedochozí k intenzivnímu dynamickému působení na povrch součásti, při kterém nastává plastická deformace a fázová transformace manganového austenitu na ϵ -fázi martenzitického typu spojená s výrazným zvýšením tvrdosti.

Při provozu v elektrárně Oslavany byla životnost oběžných kol (50-100 provozních hodin) i dalších exponovaných částí čerpadla velmi nízká. Čerpadla byla provozována v bagrovací stanici u bloku 50 MW, kde se dopravovala hydraulicky na složiště do vzdálenosti 600 m granulovaná struska z výtavného kotle spalujícího černé uhlí s popelovitostí asi 50 %. Při provozu prošla čerpadlem hydrosměs se zahuštěním asi 1:30. Množství strusky bylo průměrně 13.2 t/h. Ostrohranná granulovaná struska s $d_{50} = 3.7$ mm a s tvrdostí 713 HV, což odpovídá tvrdosti 6-7 podle Mohse, se ukázala jako jeden z nejabrazivnějších materiálů. Struska byla velmi křehká a snadno se štěpila na menší částice s velmi ostrými hranami. To způsobovalo velmi intenzivní erozivní opotřebení náběžných hran i konců lopatek oběžného kola, těsnících kruhů i vlastního tělesa čerpadla. Nedodržení předepsané spáry (0.2 mm) mezi těsnícím kruhem a oběžným kolem se projevilo intenzivním prouděním hydrosměsi z výtlačku do sání, což způsobilo extrémní opotřebení těsnícího kruhu. Silnou turbulencí a lokální erozi způsobila též spára mezi vtokem a těsnícím kruhem. Lokální erozivní opotřebení na těsnících kruzích bylo způsobeno nepřesnou montáží při opravách čerpadel.

Použitím bílých litin typu Cr12Mo1 se sice podařilo zvýšit životnost oběžných kol 4 - 5ti násobně, ale ekonomie provozu hydraulické dopravy popelovin byla nadále nevýhodná. Proto bylo nutné zvolit jiný systém pro dopravu popelovin.

Řešení se našlo použitím dopravy popelovin z prostoru spalovací komory redlery a odvozem pomocí kolejové dopravy na složiště. Výrazně poklesly náklady na údržbu a podařilo se docílit projektovaných parametrů

elektrárenského bloku. Analýza ukázala, že projektant energetického bloku při volbě hydraulické dopravy popelovin řádně neposoudil specifické podmínky spalovacího procesu a charakter spalovaného uhlí. Také konstrukce a použité materiály pro funkční části bagrovacího čerpadla byly nevhodné.

Vývojem nového typu bagrovacího čerpadla s optimálním řešením tvaru lopatek a vstupní části oběžného kola při použití bílé chromové litiny Cr12Mo1 a později Cr27 se však podařilo podstatně zvýšit u dalších elektráren životnost těchto čerpadel [38].

6.2. Opotřebení ventilátorových mlýnů

Pro mletí uhlí se v teplárnách a elektrárnách používají často ventilátorové mlýny. U těchto mlýnů dochází k erozivnímu opotřebení mlecích desek, rohových a obvodových pancířů i vlastního rotoru. Mlecí desky erodují na vstupní části, kde je velký úhel nárazu, a na výstupní části, kde je malý úhel nárazu. Vzhledem k nebezpečí vniknutí cizích těles do pracovního prostoru mlýna se používá pro výrobu mlecích desek manganová austenitická ocel. Prodloužení životnosti desek lze dosáhnout změnou jejich tvaru – zesílením vstupní hrany desek a na výstupní části desek zabráněním lokálního opotřebení rovnoměrnějším rozdělením mletého uhlí a vhodným tvarem. Případně použitím dělených desek složených z materiálů s optimální odolností proti erozivnímu opotřebení v uvedených partiích.

Uhlí se dále drtí při dopadu na obvodové pancíře. Dopadová rychlost částic je $\sim 100 \text{ ms}^{-1}$. Erozivní opotřebení je způsobeno jak těmito částicemi, tak částicemi unášenými proudem plynu podél stěn skříně mlýna. Životnost pancířů závisí na typu mlýna i na druhu zpracovávaného uhlí. Údržba obvodového pancéřování je velmi obtížná a časově náročná. Při použití bílých litin typu Cr27 a Cr15Mo2 se podařilo zvýšit životnost pancířů 2 – 3x.

7. Závěry

Erozivní opotřebení patří mezi velmi intenzivní degradační faktory v řadě průmyslových aplikací. Velká variabilita podmínek erozivního porušování materiálů a omezené znalosti o jejich působení na jeho intenzitu neumožňují predikci chování strojních součástí.

V řadě případů je životnost součástí určena lokálním procesem eroze, který vzniká v místech se zvýšenou koncentrací částic a s jejich zvýšenou dopadovou rychlostí.

Laboratorní i provozní zkoušky odolnosti proti erozivnímu opotřebení za definovaných podmínek umožňují zúžit výběr vhodných materiálů při řešení konkrétních problémů s opotřebením vyvolaným dopadajícími částicemi.

Při řešení problémů s nízkou životností důležitých funkčních součástí je nezbytná spolupráce technologů i konstruktérů.

Literatura

- [1] Vocel, M.-Dufek, V.: Tření a opotřebení strojních částí, SNTL, Praha, 1976, 374 str.
- [2] Mewes, D.: Modellvorstellung für den Verschleissmechanismus beim Prallbeschuss kristalliner Werkstoffoberflächen. Dissertation, TU Berlin, 1970
- [3] Suh, N.P: Tribophysics. 1986, Prentice-Hall, Inc.
- [4] Hutchings, I.M: Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials. Arnold, London.
- [5] Wellinger, K. – Uetz, H.: Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von körnigen Stoffen. VDI-Forschungsheft 449, Ausgabe B, Bd. 21, 1955
- [6] Hutchings, I.M.: A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, 70, 1981, str. 269
- [7] Finnie, I.: Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 3, 1960, str. 87-103
- [8] Finnie, I. – Wolak, J. – Kabil, Y.: Erosion of Metals by Solid Particles. *J. of Materials*, 1967, 2, č. 3, str. 682-700
- [9] Bitter, J.G.A.: A Study of Erosion Phenomena. Part I and II. *Wear*, 6, 1963, str. 5-16, 169-190
- [10] Neilson, J.H. – Gilchrist, A.: Erosion by a Stream of Solid Particles. *Wear*, 11, 1968, str. 111-122
- [11] Neilson, J.H. – Gilchrist, A.: An Experimental Investigation into Aspects of Erosion in Rocket Motor Tail Nozzles. *Wear*, 11, 1968, str. 123-143
- [12] Sato, S. – Shimizu, A. – Yokomine, T.: Numerical prediction of erosion for suspension flow duct. *Wear*, 186-187, 1995, str. 203-209
- [13] Kozyrev, Sp.: Iznašivanije metallov gidroabrazivnym potokom. *Mašinovedeniye*, 1969, č.6, str. 106-112
- [14] Wood, Ch.D. – Espenschade, P.W.: Mechanism of Dust Erosion. *SAE Trans.*, 73, 1965, str. 515-523
- [15] Tilly, G.P.: Sand Erosion of Metals and Plastics: A Brief Review. *Wear*, 14, 1969, str. 241-248
- [16] Shayler, P.J. – Yee, K.H.: Erosion of AISI 303 steel by fine (about 5 μm and about 50 μm) ash particles. *Wear*, 98, 1984, str. 127-140
- [17] Levy, A.V. – Yau, P.: Erosion of steels in liquid slurries. *Wear*, 98, 1984, str. 163-182
- [18] Kleis, I. a kol.: Opyt po uveličeniju erozionnoj stojkosti razmolno-smesitelnogo oborudovanija. Sborník mezinárodní konference „Opotřebení strojů částicemi“, Praha, 1982.
- [19] Uemois, H. – Kleis, I.: A critical analysis of erosion problems which have been little studied. *Wear*, 31, 1975, str. 359-371
- [20] Kaščejev, V.N.: Abrazivnoje razrušenije tverdyh tel. Izd. Nauka, 1970
- [21] Goodwin, J.E. – Sage, W. – Tilly, G.P.: Study of Erosion by Solid Particles. *Proc. Inst. of Mech. Engrs*, 1969-70, 184, Part 1, č. 15, str. 279-292

- [22] Uetz, H.: Najboleje važnyje rezultaty issledovanij abrazivnoj eroziji, provedenyh v Štuttgartskom universitete. Trudy TPI, ser. A, 1973, č. 347, str. 3-22
- [23] Kuklík, V. – Vocel, M. - Suchánek, J.: Vliv struktury na velikost erozivního opotřebení a na hodnotu rychlostního exponentu. Strojírnoství, 37, 1987, č. 4, str. 242-245
- [24] Vocel, M. – Kuklík, V.: Odolnost vybraných čs. materiálů v podmínkách eroze částicemi. Strojírenská výroba, 1984, č. 12, str. 912-917
- [25] Kuklík, V.: Optimalizace volby bílých litin, úsporně legovaných chromem v podmínkách intenzivního opotřebení částicemi. Kandidátská disertační práce, ČVUT v Praze, Fak. strojní, 1990
- [26] Tilly, G.P.: A Two Stage Mechanism of Ductile Erosion. Wear, 23, 1973, str. 87-96
- [27] Rjachin, D.A. – Chajmzon, M.E.: Metody ocenki gazoabrazivnoj iznosostojkosti po kriterijam soprotivlenija poverchnostnyh slojev materialov mikroplastičeskomu deformirovaniju. Trenije i iznos, 10, 1989, č. 4, str. 706-711
- [28] Juksti, L.A.: O roli adsorbcionnogo poniženija pročnosti v processe eroziji v korodujuščej srede. Trudy TPI, č. 381, 1975, str. 87-92
- [29] Levy, A.V. – Yan, J. – Paterson, J.: Elevated temperature erosion of steels. Wear, 108, 1986, str. 43-60
- [30] Levy, A.V. – Hickey, G.: Erosion of corrosion-resistant surface treatments on alloy steels. Wear, 108, 1986, str. 61-80
- [31] Head, W.J. – Haar, M.E.: The development of a model to predict the erosion of materials by natural contaminants. Wear, 15, 1970, str. 1-46
- [32] Suchánek, J.- Kuklík, V. - Vocel, M.: Vliv některých strukturních faktorů bílých chromových litin a ocelí na jejich odolnost proti erozivnímu opotřebení. Strojírnoství, 37, 1987, č. 4, str. 242-245
- [33] Garber, M.E. – Zejlikman, I.D. – Cypin, I.I.: Issledovanije svojstv iznosostojkogo belogo čuguna. Litejnoje proizvodstvo, 1965, č. 8, str. 1-4
- [34] Grinberg, N.A. a kol.: O vlijaniji legirovanija ferrita i karbidnej fazi na iznosostojkost stalej. MITOM, 1971, č. 9, str. 57-59
- [35] Suchánek, J.: Vliv tepelného zpracování chromových subledeburitických a ledeburitických nástrojových ocelí na jejich odolnost proti opotřebení částicemi. Kandidátská disertační práce, ČVUT – FS, 1974
- [36] Suchánek, J. – Vocel, M. – Bakula, J.: Volba materiál na strojní součásti vystavené erozivnímu účinku částic. Strojírnoství, 30, 1980, č. 5, str. 294-301
- [37] Suchánek, J. – Smrkovský, E. – Grinberg, N.A. – Blaškovič, P.: Erosive and hydroabrasive resistance of hardfacing materials. Wear, 233-235, 1999, str. 229-236
- [38] Suchánek, J. – Zdravecká, E.: Abrasion and erosion resistance of selected coatings and surface layers. Proc. 4-th Intern. Tribology Conf., TRIBOLOGY

OF SURFACE LAYERS AND COATINGS, PRAGOTRIB 2004, Praha, 17-18.6.2004, 12 str.

[38] Suchánek, J. – Vocel, M.: Erosive wear of dredge pumps. Tribologia, Teoria i praktyka, XXVIII, 1997, č. 4/97, str. 403-415

Doc.Ing. Jan Suchánek, CSc.

Doc.Ing. Jan Suchánek, CSc, se narodil 4 června 1941 v Brně. Základní a jedenáctiletou školu absolvoval v Praze. V letech 1958 až 1963 studoval na ČVUT v Praze, Fakulta strojní, kde dokončil své studium ve specializaci strojírenská technologie – metalografie.

Po ukončení studia nastoupil do ČKD Sokolovo, později ČKD Lokomotivka, kde v letech 1963-1966 pracoval jako odborný pracovník v útvaru hlavního metalurga (konstruktér přípravků pro mezioperační tepelné zpracování).

Od roku 1966 pracoval ve Státním výzkumném ústavu materiálu Praha, nyní SVÚM a.s. – jako odborný pracovník. V letech 1966/67 absolvoval postgraduální kurs „Nauka o materiálu a tváření“ na ČVUT - Fakultě strojní.

V roce 1968 zahájil vědeckou přípravu ve vědním oboru 1012 - „Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu“ ve specializaci „Mezní stavy materiálu“. Kandidátskou disertační práci „Vliv tepelného zpracování chromových subledeburitických a ledeburitických nástrojových ocelí na jejich odolnost proti opotřebení částicemi“ obhájil 5.5.1975 na Fakultě strojní. Po ukončení vědecké přípravy pracoval jako vědecký pracovník, později jako samostatný vědecký pracovník v oblasti opotřebení materiálu.

V letech 1990-1991 byl náměstkem ředitele SVÚM, dále zpracovával privatizační projekt Státního výzkumného ústavu materiálu Praha (1991-1992). Od roku 1993 byl vedoucí oddělení opotřebení a později vedoucí oddělení tepelného zpracování a tribologie. V letech 1994-1999 vykonával funkci předsedy nebo člena dozorčí rady SVÚM a.s.

Od roku 1999 pracuje ve firmě ATG, s.r.o. jako projektový manažer – Tribologie, kde řeší výzkumné projekty v oblasti tření a opotřebení materiálu.

V letech 1999 - 2004 byl na částečný úvazek odborným asistentem na katedře materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty, ČZU Praha. Byl garantem předmětu „Nauka o materiálu“.

V roce 2002 se habilitoval na ČVUT v Praze, Fakulta strojní v oboru Nauka o materiálu

Od roku 2004 – dosud vede Ústav strojírenské technologie na ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

V letech 1966 – 1999 hlavní řešitel nebo spoluřešitel výzkumných úloh v rámci státního plánu vědy a výzkumu a výzkumných úloh zadávaných podniky. Od roku 1995 je hlavním řešitelem 2 projektů v rámci programu EUREKA (SUBLATO a EXCOAT), 2 projektů v rámci programu COST 516 Tribology, 1 projektu v rámci programu COST 532, 1 projektu v rámci programu COST 533, 1 grantu GAČR a 1 projektu v rámci Strukturálních fondů. Dále je spoluřešitelem 1 mezinárodního projektu v rámci 5RP, 2 grantů GAČR, 2 projektů v rámci programu EUREKA (UPLETOOLS a PROSURFMET) a 1 projektu v rámci programu COST 532.

Publikační činnost od roku 1985 zahrnuje 7 knižních publikací, 43 oponovaných výzkumných zpráv, 35 neoponovaných výzkumných zpráv a odborných posudků, 14 původních článků v českých odborných časopisech, 22 původních článků v mezinárodních recenzovaných časopisech, 85 příspěvků na zahraničních konferencích (SSSR, Rusko, Maďarsko, Polsko, SRN, NDR, Bulharsko, SR, Španělsko, Finsko, Belgie, Velká Británie, Dánsko, Norsko, Slovensko), 24 příspěvků na tuzemských konferencích a odborných seminářích, 2 odborné články popularizační, 1 užitiný vzor.

Doc. Suchánek byl vědeckým tajemníkem odborné sekce Tribologie v rámci České strojnické společnosti (1969 – 1992). Je prezidentem České tribologické společnosti (1993 – dosud), viceprezidentem International Tribology Council (1996 – dosud), jednatelem České společnosti pro výzkum zpracování plechu (1996 – dosud) a členem redakční rady časopisu Hutnické listy (1998 – dosud).

Dále zastupoval Českou republiku v Managing Committee COST 516 Tribology (1995-2000), zastupuje Českou republiku v Managing Committee COST 532 (2003 – dosud) a v Managing Committee COST 533 (2005 – dosud)

Je hlavní organizátor odborných seminářů a konferencí pořádaných Českou tribologickou společností a Českou společností pro výzkum zpracování plechu v ČR.

Je člen organizačních výborů konferencí zaměřených na problematiku tribologie pořádaných v ČR a v zahraničí.