

Aplikácie difúzie v strojárskovej výrobe

Martin Jaško, Ing.

HS Technik, spol. s r. o.,
Žilinská cesta 84, 013 11 Lietavská Lúčka.
E-mail: martin.jasso22@gmail.com, Tel.: + 421 902 394 938

Richard Pastirčák, doc. Ing., PhD.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: richard.pastircak@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 27 97

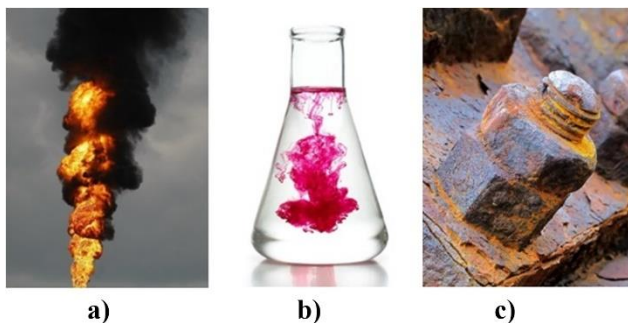
Diffusion and its applications in mechanical engineering

Abstract: This thesis aims to explain the nature of the diffusion process and the importance of this process in the field of engineering production. The thesis contains information on the principles and mechanisms by which diffusion takes place, as well as on the environmental influences and factors that directly affect this process. The thesis concludes with a description of selected manufacturing and surface treatment processes used in mechanical engineering, the principal basis of which is diffusion.

Keywords: diffusion, diffusion mechanisms, diffusion bonding, chemical-thermal treatment

ÚVOD

Pojem difúzia pochádza z latinského slova „diffusio“ a je možné ho voľne preložiť ako šírenie, prenos alebo distribúciu. Z odborného hľadiska je možné difúziu vysvetliť ako proces prenosu hmoty (atómy, ióny, molekuly) alebo energie na dlhšie aj kratšie vzdialenosti, kedy dochádza k prenosu častíc z prostredia s vyšším obsahom určitej látky do prostredia, kde je obsah tejto látky nižší a to pôsobením a zvyšovaním energie (teplo). K tomuto prenosu môže samozrejme dôjsť len pri predpoklade, že difundujúca častica je v danom prostredí aspoň čiastočne rozpustná.



Obr. 1. Difúzia v prírode: a) v plynnom skupenstve, b) v kvapalnom skupenstve, c) v tuhom skupenstve

V prírode difúzia prebieha vo všetkých troch skupenstvách (obr.1) a je možné ju pozorovať napríklad pri lúhovaní čaju v horúcej vode (v studenej vode prebieha difúzna značne pomalšie), pri šírení vône z parfumy, alebo pri pozorovaní korózie oceľových súčastí, ktorá je v podstate dôsledkom

difúzie častíc obsiahnutých v zemskej atmosfére (kyslík, vodík). Difúziu môžeme pozorovať aj na vlastnom tele, napríklad pri užívaní vitamínov, kedy dochádza k rozpúšťaniu a prenosu častíc obsiahnutých v médiu do organizmu.

Difúzia prebieha vo všetkých prostrediach, ale v technologickej praxi je možné tento proces eliminovať úplne, napríklad pri podmienkach vákua, kedy difúzia neprebíha vôbec, taktiež ako neprebíha pri teplote prostredia rovnajúcej sa absolútnej nule ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Z dôvodu vyšších nákladov, potrebných pre vytvorenie takéhoto prostredia, sú však tieto možnosti využívané len pre výskumné účely [1, 2].

Najväčší rozvoj v oblasti teórie difúzie nastal v 19. storočí a je spojený s *Adolfom Fickom*, nemeckým lekárom a biofyzikom, ktorý okrem iného ako prvý skonštruoval a patentoval prístroj na meranie krvného tlaku. Jeho synovec, s rovnakým menom, zas ako prvý skonštruoval sklenené kontaktné šošovky.

1 FICKOVE ZÁKONY

Základným pilierom teórie difúzie sú dva *Fickove zákony*. *Adolf Fick* sa snažil difúziu pochopiť a vysvetliť ako pozorovateľný pohyb častíc hmoty alebo energie. Na opísanie tohto pohybu použil dve dôležité veličiny; prvou je koncentrácia difundujúcej látky c a druhou je čas procesu τ . Za hybnú silu v tomto procese je považovaný gradient koncentrácie.

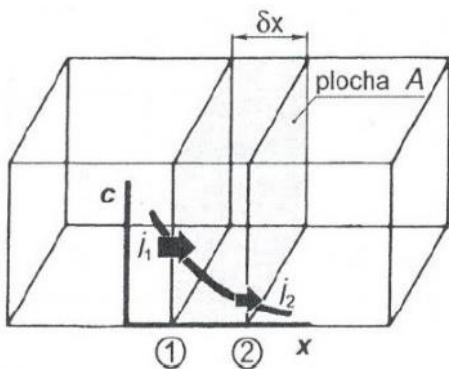
Zjednodušene je možné povedať, že *I. Fickov zákon* vyjadruje, koľko atómov, iónov alebo molekúl

difunduje materiálom a akou rýchlosťou. Matematické vyjadrenie *I. Fickovho zákona* je nasledujúce (1):

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

Index J vyjadruje intenzitu difúzneho toku, index c vyjadruje koncentráciu difundujúcej látky a index x reprezentuje vzdialenosť medzi dvoma bodmi s rozdielnou koncentráciou. Index D symbolizuje difúzny koeficient, ktorý je rozdielny pre každý typ materiálu a znamienko mínus pred týmto koeficientom znamená, že prenos častíc prebieha proti koncentračnému gradientu, teda z miesta s vyššou koncentráciou do miesta s nižšou koncentráciou. Z teoretického hľadiska by po vyrovnaní týchto koncentrácií malo dôjsť k zastaveniu procesu difúzie, ale v praxi sa bežne vyskytuje aj jav, kedy difúzia pokračuje ďalej - tzv. jav opačnej difúzie.

Principiálne *II. Fickov zákon* vychádza z *I. Fickovho zákona*, ale s tým rozdielom, že počíta s možnosťou zmeny objemovej koncentrácie c v závislosti nielen od polohy x , ale aj času τ (obr.2).



Obr. 2. Model difúzneho toku podľa *II. Fickovho zákona*

II. Fickov zákon znie: „Časová zmena koncentrácie látky v danom mieste je priamo úmerná priestorovej zmene gradientu koncentrácie, pričom konštantou úmernosti je difúzny koeficient D . Difúzny koeficient D je konštantou, ktorá charakterizuje, ako ľahko daná látka difunduje do prostredia“. Matematické vyjadrenie *II. Fickovho zákona* je nasledujúce (2):

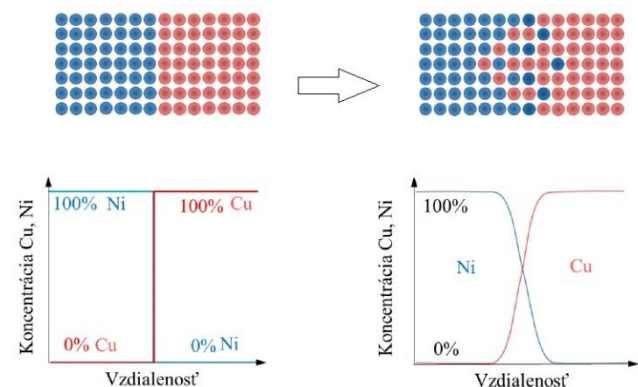
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

V praxi môže nastať prípad, kedy sa prvý člen matematického vyjadrenia *II. Fickovho zákona* rovná nule ($\partial c / \partial \tau = 0$). Tento stav sa nazýva stacionárna difúzia a stretávame sa s ním napríklad pri procese čistenia vodíka. Pri väčšine praktických prípadov však dochádza k nestacionárnej difúzii a difúzny tok $J \neq \text{konšt.}$, ale mení sa s polohou x [2, 3].

2 DIFÚZIA V KOVOCH A ZLIATINÁCH

Ako už bolo uvedené, difúzia prebieha vo všetkých troch skupenstvách, ale v prípade tuhého skupenstva

je tento proces jediný možný spôsob prenosu hmoty. Chemická podstata difúzie, podľa druhého termodynamického zákona je, že systém sa v každom prípade snaží dostať do stavu s najnižšou hodnotou vnútornej energie. Táto snaha sa uskutočňuje presúvaním atómov z energeticky nevýhodných polôh do polôh energeticky výhodných a tento presun je podmienený uvoľnením týchto atómov z ich rovnovážnych polôh. V pevnom skupenstve sú atómy v kryštálovej mriežke viazané rôznymi chemickými väzbami, ktoré sú relatívne silné a pre uvoľnenie atómu z tejto mriežky je potrebné dodať systému pomerne dosť veľkú energiu (vysoká teplota). Zvyšovaním teploty sa zvyšuje amplitúda kmitov atómu v mriežke až do stavu, kedy sa atóm z kryštálovej mriežky uvoľní.



Obr. 3. Vznik difúznej vrstvy medzi článkami Ni a Cu

Prenos hmoty pomocou difúzie je znázornený na obr. 3. V prípade dvoch kovov, napr. nikel (Ni) a meď (Cu), sa položia a spoja tak, aby boli aspoň jednou plochou v čo najtesnejšom kontakte. Po vystavení týchto kovov vysokej teplote (nižšej ako je teplota topenia oboch materiálov) po určitý čas, dôjde medzi kovmi k obojstrannému prenosu častíc. Po ochladení týchto kovov na teplotu okolia a následnou chemickou a štruktúrnou analýzou je možné pozorovať, že medzi týmito dvoma kovmi došlo k vzniku novej $Ni-Cu$ zliatiny. Atómy medi difundovali do niklu a naopak, nikel difundoval do medi (obr. 3). Proces difúzie (presunu) atómov jedného kovu do druhého, sa nazýva vzájomná difúzia alebo difúzia prímiesí. Difúzia v jednodložkovej sústave sa nazýva autodifúzia. V heterogénnych sústavách je možné pomocou difúzie meniť chemické zloženie jednotlivých fáz a taktiež znižovať koncentračné rozdiely medzi fázami. V prípade, že dochádza k zvyšovaniu koncentračných rozdielov, sa hovorí o obrátenej (opačnej) difúzii.

Vplyv difúzie na vlastnosti materiálu môže mať pozitívny aj negatívny výsledok. Ako pozitívum je možné spomenúť vytváranie difúzných vrstiev postupmi a procesmi chemicko-tepelného spracovania, kedy dochádza k zmene koncentrácie určitého prvku v povrchovej vrstve obrobku, čo sa prejaví zlepšením určitých mechanických vlastností

(tvrdosť, pevnosť v ťahu) a zvýšením odolnosti voči opotrebeniu. Medzi negatívne vplyvy difúzie patrí napríklad oduhličovanie nástrojových ocelí, spracovávaných pri vysokých teplotách. Taktiež medzi nežiaduce zmeny v kryštalografickej mriežke patrí difúzia vakancií, ktoré sa pri tečení (*creep*) spájajú na hraniciach zŕn do kavit, ktoré sú iniciátorom medzikryštalového lomu [3-5].

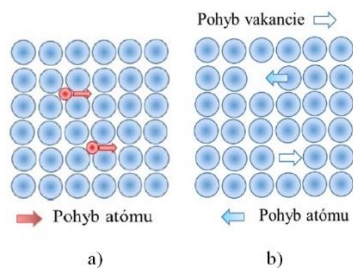
3 MECHANIZMY DIFÚZIE

Z hľadiska zmeny kryštalografickej mriežky základného materiálu, sa môže difúzia definovať ako samovoľný proces, pri ktorom častice jednej látky (atómy, ióny, molekuly) prenikajú medzi častice druhej látky, ako dôsledok vyrovnávania koncentračného gradientu. Toto prerozdelenie častíc látky umožňuje vznik úplne nových fáz. Najjednoduchším spôsobom prechádzania častíc hmoty v tuhom skupenstve je prenos častíc v mieste kontaktu dvoch zložiek.

Principiálne je možné rozdeliť mechanizmy, ktorými dochádza k prenosu častíc v kovových materiáloch, do dvoch skupín, na individuálne a skupinové.

Individuálne mechanizmy sú charakteristické tým, že presun častice (atómu) alebo vakancie prebieha nezávisle od ostatných atómov. Tieto mechanizmy difúzie sa podľa spôsobu prenosu, rozdeľujú na intersticiálne a vakančné mechanizmy.

Intersticiálny mechanizmus je možné uplatniť, ak sú splnené podmienky pre vznik intersticiálneho tuhého roztoku a atómy difundujúceho prvku sú dostatočne malé na to, aby sa mohli pohybovať vo voľnom priestore v kryštalovej mriežke základného prvku (obr. 4a).

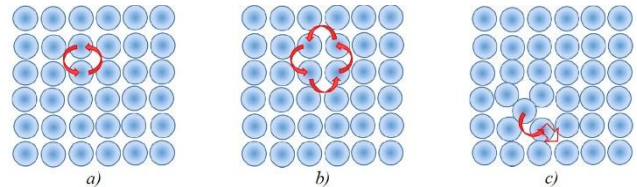


Obr. 4. Individuálne mechanizmy difúzie: a) intersticiálny mechanizmus, b) vakančný mechanizmus

Vakančný mechanizmus je charakteristický preskokom atómov do blízkych vakancií (obr. 4b). Mechanizmus sa uplatňuje v prípadoch, kedy sú veľkosti difundujúcich častíc približne rovnako veľké, ako častice základnej látky. Týmto mechanizmom môžu vniknúť substitučné tuhé roztoky, v ktorých sú atómy základného prvku nahradené atómami prídavného prvku, alebo sa presúvajú atómy vlastného prvku (samodifúzia), pri znižovaní úrovne vnútornej energie (voľnej entalpie). Aktivačná energia vakančného mechanizmu je vyššia, ako pri intersticiálnom mechanizme a to z toho dôvodu, že

vakancie sa musia najskôr vytvoriť a následne premiestniť.

Pri skupinových mechanizmoch difúzie dochádza k presunu viacerých, najčastejšie susedných častíc. Podľa spôsobu prenosu atómov sa rozdeľujú skupinové mechanizmy na výmenné, kruhové a nepriame intersticiálne mechanizmy.



Obr. 5. Skupinové mechanizmy difúzie: a) výmenný, b) kruhový, c) intersticiálny nepriamy

Výmenný mechanizmus (dvojoblúkový) je charakteristický výmenou pozícií dvoch susedných, rovnako veľkých atómov, pričom pri tejto výmene dochádza k distorzii (skrúteniu) mriežky (obr. 5a). Aktivačná energia, potrebná pre výmenu atómov, je niekoľko násobne vyššia, ako pri presune interstície alebo vakancie. Z toho dôvodu je pravdepodobnosť výskytu tohto mechanizmu veľmi malá.

Kruhový mechanizmus (viacoblúkový) je charakteristický výmenou pozícií viacerých, rovnako veľkých atómov, ktoré sú v tesnej blízkosti (obr. 5b). Tieto presuny sú asi o tretinu energeticky náročnejšie ako vakančný mechanizmus.

Nepriamy intersticiálny mechanizmus je založený na presune atómu cez intersticiálne polohy v kryštalovej mriežke základného prvku a to z jednej uzlovej polohy do druhej (obr. 5c). Aktivačná energia, potrebná pre tento typ presunu atómu, je niekoľko násobne vyššia, ako pri intersticiálnom mechanizme.

4 VPLYV PROSTREDIA NA DIFÚZIU

Rýchlosť difúzie závisí od viacerých faktorov, napríklad od teploty, času, aktivačnej energie (aktivačná energia je energia potrebná na uvoľnenie atómov z kryštalovej mriežky), chemického zloženia jednotlivých fáz, fázového rozhrania, rozpustnosti difundujúceho prvku v danej fáze, koncentrácia porúch v mriežke a podobne.

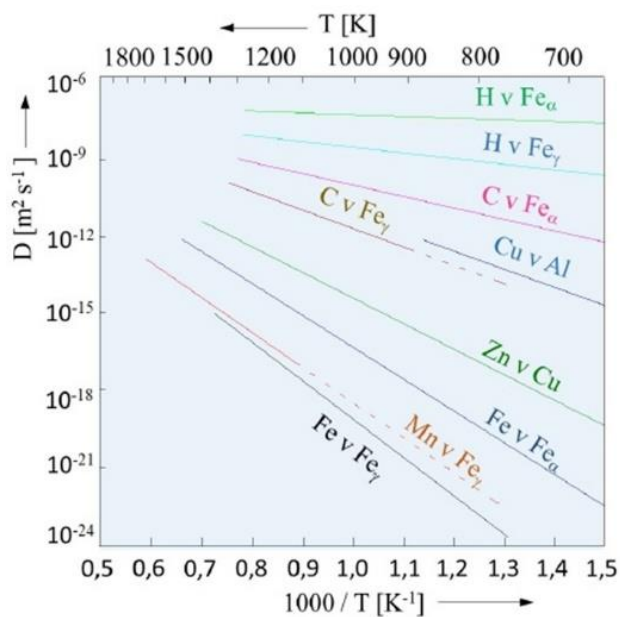
Zo všetkých spomínaných faktorov, práve teplota má najväčší vplyv na rýchlosť difúzie. Schopnosť častice (atómu alebo iónu) pohybovať sa rastie so zvyšujúcou sa tepelnou energiou – inak povedané, s rastúcou teplotou bude mať atóm väčšie množstvo energie a jej účinkom bude schopný premiestniť sa z jednej polohy do polohy druhej (obr. 6).

V roku 1889 švédsky fyzik a chemik *Svante Arrhenius* sformuloval teóriu, ktorá sa vzťahuje na rýchlosť reakcie a teplotu, potrebnú pre priebeh tejto reakcie. Jedným z výstupov tejto teórie je fakt, že reakčná rýchlosť mnohých chemických reakcií sa zdvojnásobí

pri každom zvýšení teploty o 10 °C (alebo K). Matematické vyjadrenie Arrheniusovej rovnice je takéto (3):

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (3)$$

Index k v tejto rovnici predstavuje rýchlostnú konštantu, A je exponenciálny faktor, ktorý je konštantou pre danú chemickú reakciu a vzťahuje sa na frekvenciu kolízií častíc, e predstavuje Eulerovo číslo, E_a je aktivačná energia, R je všeobecná plynová konštant a T je absolútna teplota (K).



Obr. 6. Závislosť koeficientu difúzie od teploty pre rôzne binárne systémy

Pri difúzii iónov dochádza aj k prenosu elektrického náboja. Tento efekt sa môže využiť v keramických materiáloch s iónovými väzbami. S rastúcou teplotou sa zrýchľuje difúzia iónov a tým aj elektrická vodivosť.

Koeficient difúzie (*difuzivita*) závisí od veľkosti aktivačnej energie a tá je priamo ovplyvňovaná štruktúrou matrice. V prípade, že má matrica tesné usporiadanie, tak je pre pohyb difundujúceho atómu potrebná vyššia aktivačná energia. Taktiež aj intenzita chemickej väzby ovplyvňuje difuzivitu, čo znamená, že pri silnej väzbe je potrebná vyššia aktivačná energia.

Menšia veľkosť atómov (atómová hmotnosť) poskytuje prvkom, ktoré difundujú intersticiálnym mechanizmom, výhodu vyššej rýchlosti pri pohybe kryštálovou mriežkou oproti substitučným prvkom.

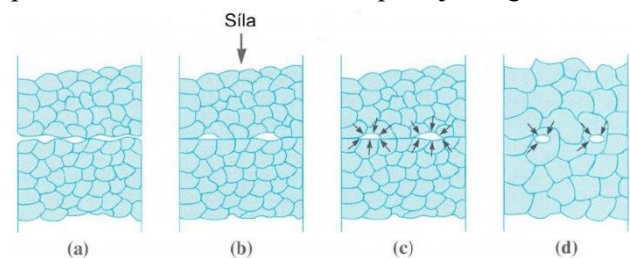
Bodové poruchy kryštalografickej mriežky (vakencie) sú využívané pri prenose hmoty alebo energie vakančným mechanizmom difúzie. Súčiniteľ difúzie priamoúmerne vzrastá so zvyšovaním koncentrácie vakancií, vďaka čomu proces difúzie prebieha rýchlejšie.

Vplyv čiarových a plošných porúch na rýchlosť difúzie je významný len pri nižších teplotách, pretože k prenosu dochádza na pomerne malých plochách. So zvyšujúcou sa teplotou sa tento vplyv znižuje a po dosiahnutí určitej teploty už nie je preukázateľný.

Vplyv koncentrácie difundujúceho prvku na difuzivitu môže byť rôzne veľký a pre každý prípad osobitý. V praxi sa často stáva, že je vplyv koncentrácie zanedbateľný, napríklad v prípade nízkej koncentrácie prímеси. Taktiež ale môže nastať opačný prípad, kedy sa môže difuzivita zvýšiť až desaťnásobne, napríklad v prípade *Au-Ni* zliatiny, pri zvyšovaní koncentrácie *Au* z 20 % na 80 %.

5 VYUŽITIE DIFÚZIE V STROJÁRSKEJ VÝROBE

V dávnej minulosti alchymisti používali vtedajšie poznatky o difúzii na ohúrenie publika, prípadne určitých vládnucich skupín. Dnes je známe, že difúzia je prírodný proces a prebieha všade okolo nás. Z hľadiska strojárkej výroby je vyvíjané úsilie buď difúziou zabrániť, z dôvodu jej nepriaznivého vplyvu na materiálové vlastnosti, alebo naopak, poznatky o difúzii použiť a tým zlepšiť parametre určitého procesu. Ako bolo už spomenuté, najväčší vplyv na difúziu má teplota, takže aj postupy a procesy, v ktorých sa difúzia používa cielene, sú charakteristické prívodom veľkého množstva tepelnej energie.

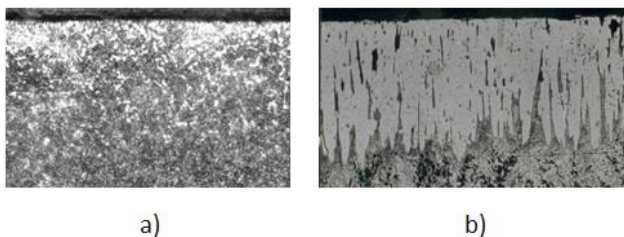


Obr. 7. Postup difúzneho spájania materiálov: a) malé kontaktné plochy pred začatím procesu, b) zväčšenie kontaktných ploch použitím sily a deformácie, c) difúzia po hraniciach zŕn, d) zaplnenie dutín počas difúzie v celom objeme

Difúzne spájanie sa používa na vytvorenie obvykle pevného spoja medzi dvoma alebo viacerými materiálmi (pevnými alebo práškovými), ktoré sa vzájomne dotýkajú bez lepidla, čo umožňuje využiť vyššie prevádzkové teploty a dosiahnuť pevnejší metalurgický spoj (obr.7). Princíp tejto metódy spočíva v tesnom kontakte dvoch súčastí (materiálov), pri pôsobení sily a zvýšenej teploty (nižšia ako je teplota topenia). Pôsobením týchto činiteľov dochádza k splošteniu povrchu a zväčšeniu kontaktných ploch medzi spojovanými materiálmi. V prípade, že už je kontaktná plocha spojená dostatočne, začína sa prenos častíc z hraníc zŕn do dutín a k rastu zŕn. Nakoniec sú všetky dutiny zaplnené a materiály sú pevne spojené. Proces difúzneho spájania materiálov

sa využíva najmä pre spájanie reaktívnych materiálov, ako je napríklad titán, alebo keramika.

Cieľom chemicko-tepelného spracovania je vytváranie povrchových difúzných vrstiev (obr.8) v kovových materiáloch (najmä nízkouhlíkové ocele) za účelom predĺžovania životnosti súčiastok, pracujúcich pri podmienkach zvýšeného namáhania. Tento proces je charakteristický nasycovaním povrchu základného materiálu atómami prvkov ako sú *C*, *N* (prípadne ich kombinácia) a *B*. Toto nasycovanie prebieha obvykle v riadených atmosférach a pri zvýšených teplotách (500 °C ÷ 1100 °C), počas určitého času (rádovo v hodinách). Počas nasycovania sa premiestňujú atómy nasycovaného prvku intersticiálnym spôsobom a konečné množstvo difundujúceho prvku v povrchovej vrstve je kontrolované (cca 1 %). Väzby, ktoré vzniknú medzi atómami v kryštálovej mriežke počas toho procesu, sú v určitých prípadoch tak silné, že je nutné po tomto procese zahrnúť aj proces popúšťania, z dôvodu vzniku možných prasklín.

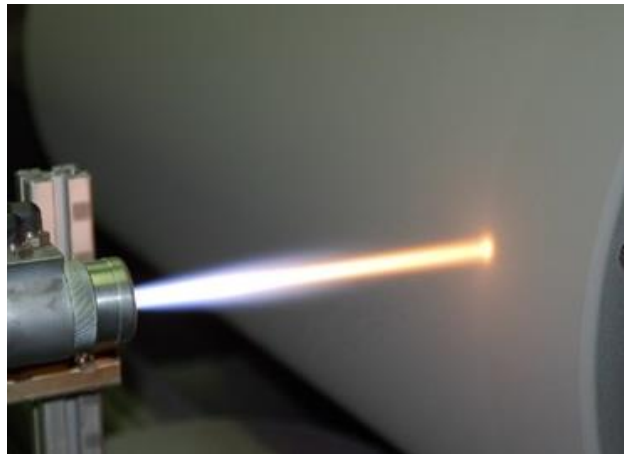


Obr. 8. Chemicko-tepelné spracovanie materiálov: a) difúzia uhlíka po nautličovaní v tuhom prostredí, b) difúzia bóru do základného materiálu pri procese boridovania

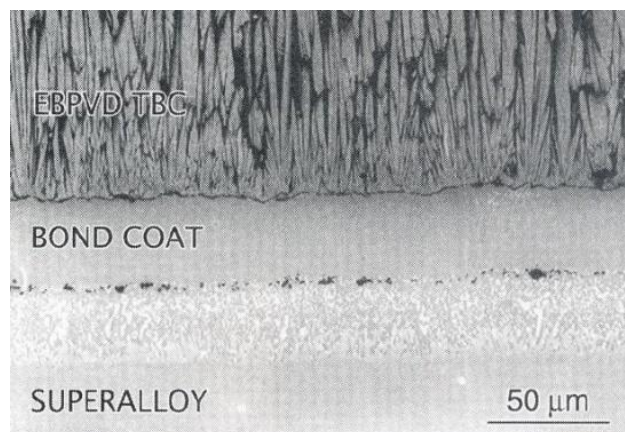
Pri procesoch úpravy povrchu pomocou povlakovania alebo žiarových nástrekov (obr. 9) má maximálny vplyv na kvalitu a funkčnosť súčiastky adhézia systému povlak - substrát, teda schopnosť dvoch materiálovo rozdielnych fáz držať spolu počas pôsobenia zaťaženia. Takisto pri tomto procese má difúzia značný vplyv, aj keď nedochádza k cieľnému ovplyvňovaniu priamo funkčnej plochy, ako v prípade chemicko-tepelného spracovania. Na to, aby povlak (nástrek) bol schopný udržať sa na základnom materiáli, musí dôjsť k výmene atómov medzi týmito dvoma fázami, čím sa vytvoria dostatočne pevné chemické väzby. Drsnosť a čistota povrchu základného materiálu majú v tomto prípade taktiež veľký vplyv na rýchlosť a kvalitu difúzie, preto je potrebné vždy súčiastky pred procesom nanášania povlaku alebo nástreku dôkladne odmastiť, prípadne znížiť profil drsnosti povrchu. V prípade vytvárania žiarových nástrekov sa pred procesom nanášania používa aj pieskovanie povrchu kremičitým pieskom, kedy po nanosení povlaku (napríklad *wolfrámkarbid*, *Mo*) dochádza k vzniku medzivrstvy, niekedy nazývanej aj *grunt*.

Pri oxidácii hliníku vzniká na povrchu oxid hlinitý (Al_2O_3). Ten vytvorí na povrchu materiálu ochrannú

vrstvu, ktorá zabraňuje prenikaniu kyslíku a chráni materiál pred koróziou.



Obr. 9. Proces nanášania žiarového nástreku



Obr. 10. Termálna bariérová vrstva (TBC), vyhotovená na legovanej Ni zliatine

Lopatky lietadlových turbín sú vyrobené z vysokolegovanej *Ni* zliatiny. Táto zliatina je chránená proti vysokým teplotám vrstvami keramických oxidov a nazýva sa *Thermal barrier coatings (TBC)* – termálna bariérová vrstva (obr.10). Množstvo kyslíka, ktoré prejde touto vrstvou ovplyvňuje rýchlosť korózie a tým aj trvanlivosť. Pre zlepšenie adhézie a difúzie medzi TBC a zliatinou sa používa zliatina molybdénu (*bond coat*).



Obr. 11. Optické vlákna umiestnené v ochranných vrstvách

Takisto sa pri optických vláknach využívajú ochranné vrstvy (povlaky), ktoré majú zabrániť difúziou vodnej páry k vláknu. V prípade difúzie by sa zvýšili optické

straty a na povrchu vlákna by sa vytvorili mikropraskliny (obr. 11).

ZÁVER

Difúzia, ako komplexný dej, sa v prírode prejavuje vo všetkých skupenstvách a rôzne jej formy a zákonitosti sú ešte aj v súčasnosti predmetom skúmania viacerých vedcov a odborníkov. Príspevok sa zaoberal najmä difúziou v tuhom skupenstve a jej využitím v strojárskvej výrobe. Znalosti o spôsoboch, ktorými prebieha difúzia a o vplyvoch prostredia na tento proces sú nutnosťou v prípade dimenzovania súčiastok vyrobených z kovových materiálov, keďže tento proces môže mať ako pozitívny, tak aj negatívny vplyv na kvalitu a funkčnosť súčiastky. Cieľom príspevku bolo vysvetliť teoretické základy prenosu častíc v tuhých skupenstvách procesom difúzie a prepojiť tieto poznatky s výrobnými a spracovateľskými postupmi, používanými v strojárskvej výrobe.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektu KEGA 022ŽU-4/2021. Autori ďakujú grantovej agentúre za finančnú podporu.

LITERATÚRA

- [1] CALLISTER, W. D. (2003): *Materials science and engineering: an introduction*. 6th ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 820 s., ISBN 0-471-22471-5.
- [2] DYBKOV, V. I. (2010): *Reaction diffusion and solid state chemical kinetics*. 2. vyd. Enfield, New Hampshire: Trans Tech Publications, ISBN 978-3-03813-445-9.
- [3] PAVELEK, M. (2023): *Termomechanika 15. Základy prenosu tepla*. Energetický ústav. [online]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/15_Prenos.pdf>.
- [4] PTÁČEK, L. et al. (2003): *Nauka o materiálu*. 2. vyd. Brno: CERM, 516 s., ISBN 80-7204-283-1.
- [5] SKOČOVSKÝ, P. (2014): *Nauka o materiáli*, Žilina: EDIS, ISBN 978-80-554-0871-2.