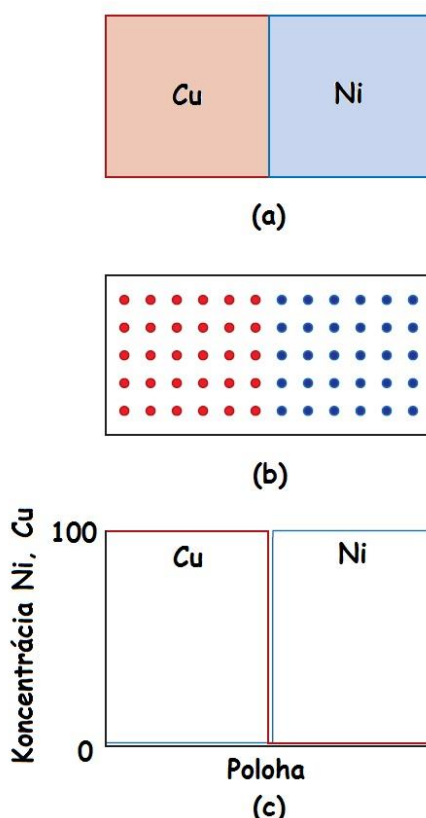


DIFÚZIA

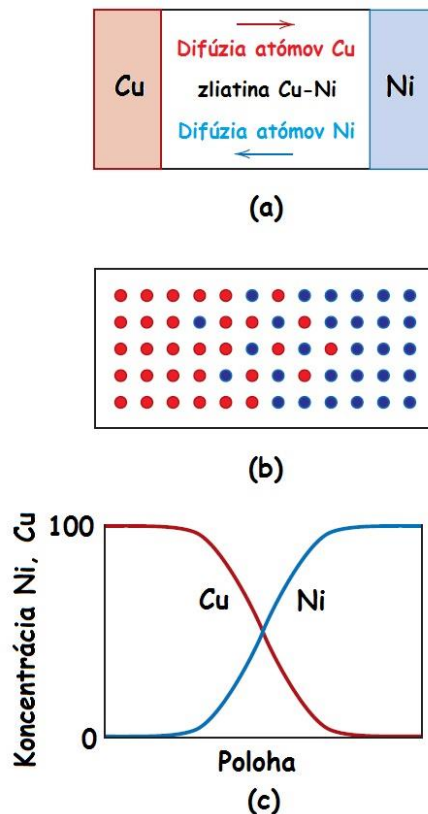
Veľa reakcií a procesov, ktoré sú dôležité pri spracovaní materiálov, sa spolieha na prenos hmoty buď v konkrétnej pevnej látke (zvyčajne na mikroskopickej úrovni) alebo z kvapaliny, plynu alebo inej pevnej fázy. To sa dosahuje difúziou, čo je prenos materiálu na atómovej úrovni (pohybmi atómov).

Difúziu je možné demonštrovať pomocou tzv. difúzneho páru, ktorý je tvorený spojením tyčí z dvoch rôznych kovov tak, aby došlo k dokonalému kontaktu medzi týmito dvoma materiálmi. **Obr.1** zobrazuje schematické znázornenie pozícií a zloženia atómov cez rozhranie pre dvojicu materiálov meď (Cu) – nikel (Ni).



Obr.1 (a) Difúzny pár meď (Cu) – nikel (Ni) pred tepelným spracovaním pri vysokej teplote. (b) Schematické znázornenie umiestnenia atómov Cu (červené bodky) a Ni (modré bodky) v rámci difúzneho páru. (c) Koncentrácie medi a niklu ako funkcia polohy v difúznom páre.

Táto dvojica sa zahrieva dlhší čas pri zvýšenej teplote (ale pod teplotou topenia oboch kovov) a ochladí sa na izbovú teplotu. Chemická analýza odhalí stav podobný stavu, ktorý je znázornený na **Obr.2**, a to čistá meď a nikel na dvoch koncoch tejto dvojice kovov a sú oddelené legovanou oblasťou. Koncentrácie oboch kovov sa líšia podľa polohy, ako je to znázornené na obrázku **Obr.2c**. Tento výsledok naznačuje, že atómy medi migrovali alebo difundovali do niklu a že nikel difundoval do medi. Tento proces, pri ktorom atómy jedného kovu difundujú do druhého, sa nazýva *interdifúzia* alebo *difúzia prímiesí*.



Obr.2 (a) Difúzny pár med' (Cu) – nikel (Ni) po vysokoteplotnom tepelnom spracovaní, znázorňujúci legovanú difúznú zónu. (b) Schematické znázornenie umiestnenia atómov Cu (červené bodky) a Ni (modré bodky) v difúznom páre. (c) Koncentrácie medi a niklu ako funkcia polohy v difúznom páre.

Interdifúziu možno z makroskopického hľadiska rozlíšiť zmenami koncentrácie, ku ktorým dochádza v priebehu času, ako v predošlom príklade pre difúzny pár med' – nikel. Jedná sa o mriežkový drift alebo transport atómov z oblasti s vysokou koncentráciou do oblasti s nízkou koncentráciou. K difúzii dochádza aj u čistých kovov, ale všetky atómové výmeny polôh sú rovnakého typu. Toto sa nazýva *samodifúzia*.

MECHANIZMY DIFÚZIE

Z atómového pohľadu je difúzia iba postupnou migráciou atómov z jedného mriežkového miesta do druhého mriežkového miesta. Atómy v pevných materiáloch sú v skutočnosti v neustálom pohybe a rýchlo si menia polohy. Aby atóm mohol urobiť takýto pohyb, musia byť splnené dve podmienky:

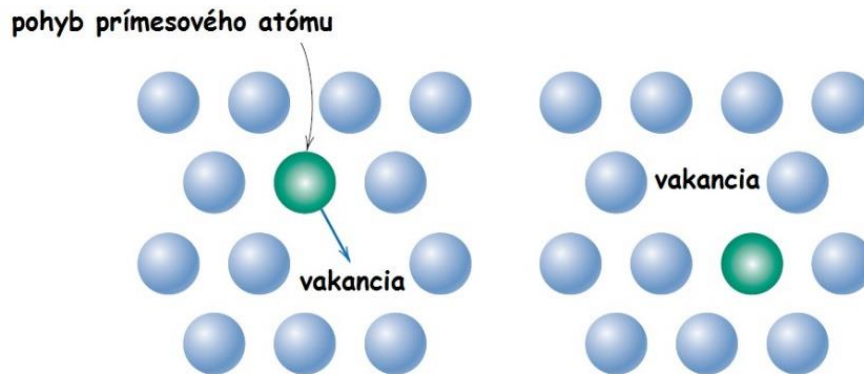
1. Musí existovať prázdne susedné miesto.
2. Atóm musí mať dostatok energie na to, aby prerušil väzby so susednými atómami a potom spôsobil určitú mriežkovú poruchu počas premiestnenia. Táto energia má vibračný charakter.

Pri špecifickej teplote je malá časť celkového počtu atómov schopná difúzneho pohybu na základe veľkostí ich vibračných energií. Táto frakcia rastie so stúpajúcou teplotou.

Pre tento atómový pohyb bolo navrhnutých niekoľko rôznych modelov, z týchto možností dominujú pre kovovú difúziu dve, a to vakančná difúzia a intersticiálna difúzia.

Vakančná difúzia

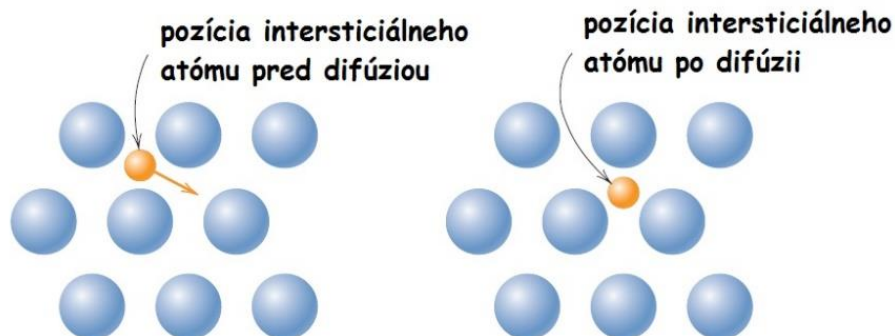
Mechanizmus pozostáva zo zámeny atómu z normálnej mriežkovej polohy na voľné susedné mriežkové miesto alebo vakanciu (**Obr.3**). Tento proces si vyžaduje prítomnosť voľných miest alebo vakancií a rozsah, v akom môže dôjsť k vakančnej difúzii, je funkciou počtu týchto defektov, ktoré sú prítomné. Významná koncentrácia vakancií môže existovať v kovoch pri zvýšených teplotách. Pretože difúzne atómy a vakancie si vymieňajú polohy, difúzia atómov v jednom smere zodpovedá pohybu vakancií v opačnom smere. Týmto mechanizmom dochádza k samodifúzii a interdifúzii, kde atómy prímiesí musia nahradiť atómy hostiteľa.



Obr.3 Schematické znázornenie vakančnej difúzie

Intersticiálna difúzia

Druhý typ mechanizmu zahrňuje atómy, ktoré migrujú z intersticiálnej polohy do susednej, ktorá je prázdna (**Obr.4**). Tento mechanizmus sa nachádza pri interdifúzii nečistôt, ako sú vodík, uhlík, dusík a kyslík, ktoré majú atómy dosť malé na to, aby zapadli do intersticiálnych polôh. Atómy hostiteľskej alebo substitučnej nečistoty zriedka tvoria intersticiálne látky a obvykle týmto mechanizmom nedifundujú.



Obr.4 Schematické znázornenie intersticiálnej difúzie

U väčšiny kovových zliatin dochádza k intersticiálnej difúzii oveľa častejšie ako k vakančnej difúzii, pretože intersticiálne atómy sú menšie a teda pohyblivejšie. Okrem toho existuje viac prázdnych intersticiálnych pozícií ako voľných vakancií. Pravdepodobnosť intersticiálneho atómového pohybu je teda väčšia ako pri vakančnej difúzii.

USTÁLENÝ (ROVNOVÁŽNY) STAV DIFÚZIE

Difúzia je časovo závislý proces, čo znamená, že v makroskopickom zmysle je množstvo prvku, ktoré sa prenáša v inom prvku, funkciou času. Často je potrebné vedieť, ako rýchlo dochádza k difúzii alebo k rýchlosti prenosu hmoty. Táto rýchlosť sa často vyjadruje ako *difúzny tok* J , ktorý je definovaný ako hmotnosť (alebo ekvivalentne počet atómov) M difundujúci cez a kolmo na jednotkovú plochu prierezu pevnej látky za jednotku času. V matematickej forme to je vyjadrené ako:

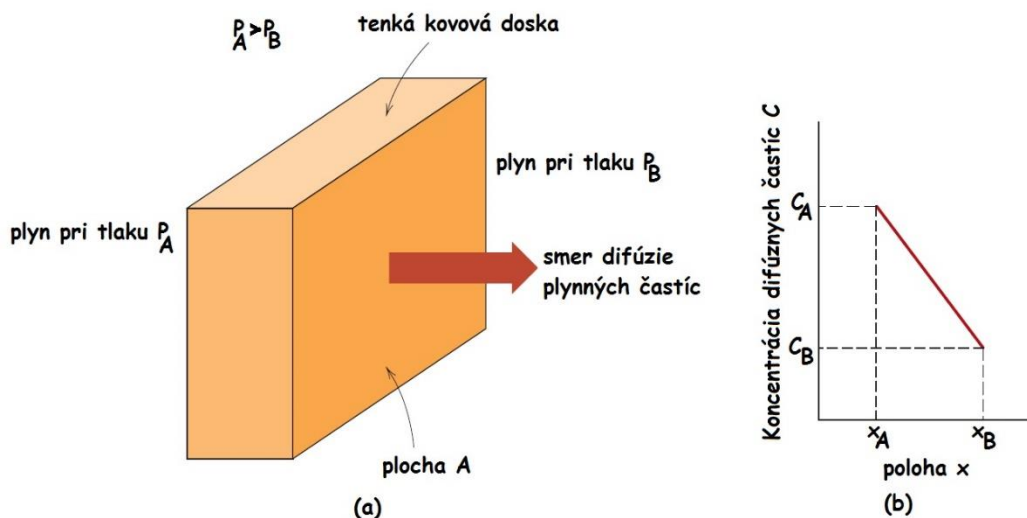
$$J = \frac{M}{A \times t} \quad (1)$$

kde A označuje oblasť cez ktorú dochádza k difúzii a t je uplynutý čas difúzie. V diferenciálnej podobe sa tento výraz vyjadruje ako:

$$J = \frac{1}{A} \times \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

Jednotky pre J sú kilogramy alebo atómy na meter štvorcový za sekundu ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ alebo $\text{atómy}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

Ak sa difúzny tok nemení s časom, hovoríme o rovnovážnom stave. Jedným z bežných príkladov difúzie v rovnovážnom (ustálenom) stave je difúzia atómov plynu cez kovovú dosku, pre ktorú sú koncentrácie (alebo tlaky) difúzných látok na oboch povrchoch doštičky udržiavané konštantne. Toto je schematicky znázornené na **Obr.5a**.



Obr.5 (a) Difúzia v rovnovážnom stave cez tenkú dosku. (b) Lineárny koncentračný profil pre difúziu v (a).

Keď sa vynesie koncentrácia C v závislosti od polohy (vzdialenosti) x v telese, výsledná krivka sa nazýva *koncentračný profil* a sklon v konkrétnom bode tejto krivky je *koncentračný gradient*:

$$\text{koncentračný gradient} = \frac{dC}{dx} \quad (3)$$

Pri tomto spracovaní sa predpokladá, že koncentračný profil je lineárny, ako je znázornené na **Obr.5b**, a:

$$\text{koncentračný gradient} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (4)$$

Pri difúzii je niekedy vhodné vyjadriť koncentráciu ako hmotnosť difundovaných častí na jednotku objemu pevnej látky (kg/m^3 alebo g/cm^3).

Matematika difúzie v ustálenom stave v jednom (x) smere je pomerne jednoduchá v tom, že tok je úmerný koncentračnému gradientu prostredníctvom výrazu:

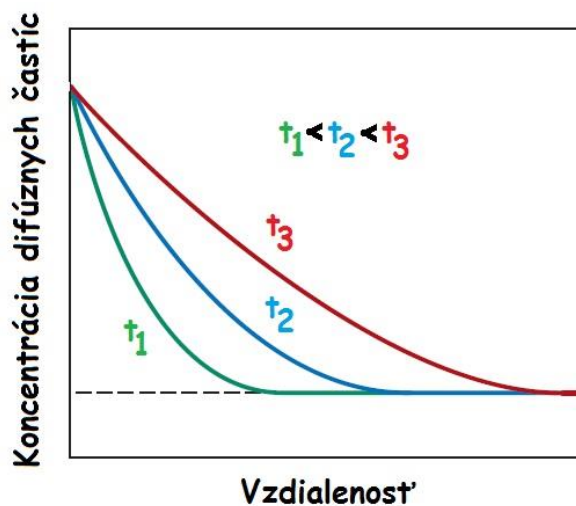
$$J = -D \times \frac{dC}{dx} \quad (5)$$

Konštanta proporcionality D sa nazýva *difúzny koeficient*, ktorý sa vyjadruje v štvorcových metroch za sekundu. Negatívne znamienko v tomto výraze naznačuje, že smer difúzie je dole v koncentračnom gradiente, od vysokej po nízku koncentráciu. Táto rovnica sa niekedy nazýva *Fickov prvý zákon*.

Jeden praktický príklad difúzie v ustálenom stave možno nájsť v čistení plynného vodíka. Jedna strana tenkej vrstvy kovového paládia je vystavená znečistenému plynu zloženému z vodíka a iných plynných látok, ako je dusík, kyslík a vodná para. Vodík selektívne difunduje cez vrstvu na opačnú stranu, kde sa udržiava vodík na konštantnom a nižšom tlaku.

NEUSTÁLENÝ (NEROVNOVÁŽNY) STAV DIFÚZIE

Častejšie sa stretáme so situáciami, kedy difúzie sú v neustálenom (nerovnovážnom) stave. To znamená, že difúzny tok a koncentračný gradient v určitom konkrétnom bode tuhej látky sa menia v čase, čo vedie k čistej akumulácii alebo vyčerpaniu difúzných častí. To je ilustrované na **Obr.6**, ktorý ukazuje profily koncentrácie v troch rôznych časoch difúzie.



Obr.6 Koncentračné profily pre difúziu v neustálenom stave pre tri rôzne časy (t_1 , t_2 a t_3).

Pri podmienkach neustáleného stavu sa používa parciálna diferenciálna rovnica, ktorá je známa ako Fickov druhý zákon:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \times \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Ak je difúzny koeficient nezávislý od zloženia (ktoré by sa malo overiť pre každú konkrétnu difúznú situáciu), rovnica sa zjednodušuje na:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

Riešenie tohto výrazu (koncentrácia z hľadiska polohy aj času) je možné, ak sú špecifikované fyzikálne významné okrajové podmienky.

Jedno prakticky dôležité riešenie je pre polonekonečnú pevnú látku (tyč tuhej látky sa považuje za polonekonečnú, ak žiadny z difúzných atómov nedosiahne koniec tyče v čase, počas ktorého dochádza k difúzii - dĺžka tyče l sa považuje za polonekonečnú, keď $l > 10 \cdot \sqrt{D \cdot t}$), v ktorej je udržiavaná konštantná povrchová koncentrácia.

Často zdrojom difúzných častí je plynná fáza, ktorej parciálny tlak sa udržiava na konštantnej hodnote. Ďalej sa predpokladajú tieto predpoklady:

1. Pred difúziou je ktorýkoľvek z difúzných atómov rozpustenej látky v tuhej látke rovnomerne distribuovaný s koncentráciou C_0 .
2. Hodnota x na povrchu je nula a zvyšuje sa so vzdialenosťou do tuhej látky.
3. Čas sa považuje za nulový bezprostredne pred začiatkom procesu difúzie.

Tieto okrajové podmienky sú jednoducho uvedené ako:

- pre $t = 0$, $C = C_0$ pri $0 \leq x \leq \infty$

- pre $t > 0$, $C = C_s$ pri $x = 0$

- pre $t > 0$, $C = C_0$ pri $x = \infty$

kde C_s je konštantná povrchová koncentrácia.

Aplikáciou týchto okrajových podmienok na predošlú rovnicu sa získa riešenie:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \times \sqrt{D \times t}}\right) \quad (8)$$

kde C_x predstavuje koncentráciu v hĺbke x v čase t . Výraz $\operatorname{erf}(x/2 \cdot \sqrt{D \cdot t})$ je *Gaussova chybová funkcia*, ktorej hodnoty sú uvedené v matematických tabuľkách pre rôzne hodnoty $x/2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$. Časť tabuľky je zobrazená v **Tab.1**. Koncentračné parametre, ktoré sa objavujú v rovnici, sú uvedené na **Obr.7**, čo je koncentračný profil vykonaný v konkrétnom čase. Rovnica teda demonštruje vzťah medzi koncentráciou, polohou a časom. Konkrétne C_x , ktorá je funkciou bezrozmerného parametra $x/\sqrt{D \cdot t}$, je možné určiť kedykoľvek a v ľubovoľnej polohe, ak sú známe parametre C_0 , C_s a D .

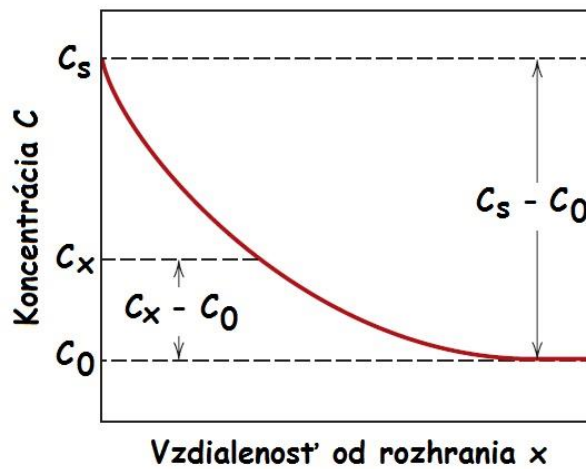
Gaussova chybová funkcia je definovaná ako:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (9)$$

kde $x/2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$ bol nahradený premennou z .

Tab.1 Tabuľka hodnôt Gaussových chybových funkcií

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0,40	0,4284	0,85	0,7707	1,6	0,9763
0,025	0,0282	0,45	0,4755	0,90	0,7970	1,7	0,9838
0,05	0,0564	0,50	0,5205	0,95	0,8209	1,8	0,9891
0,10	0,1125	0,55	0,5633	1,0	0,8427	1,9	0,9928
0,15	0,1680	0,60	0,6039	1,1	0,8802	2,0	0,9953
0,20	0,2227	0,65	0,6420	1,2	0,9103	2,2	0,9981
0,25	0,2763	0,70	0,6778	1,3	0,9340	2,4	0,9993
0,30	0,3286	0,75	0,7112	1,4	0,9523	2,6	0,9998
0,35	0,3794	0,80	0,7421	1,5	0,9661	2,8	0,9999



Obr.7 Koncentračný profil pre difúziu v neustálenom stave.

Predpokladajme, že je potrebné dosiahnuť určitú špecifickú koncentráciu rozpustenej látky C_1 v zliatine, tak ľavá strana rovnice sa teraz stáva:

$$\frac{C_1 - C_0}{C_s - C_0} = \text{konštantná} \quad (10)$$

Za týchto okolností je pravá strana toho istého výrazu tiež konštantá:

$$\frac{x}{2 \times \sqrt{D \times t}} = \text{konštantná} \quad (11)$$

Alebo:

$$\frac{x^2}{D \times t} = \text{konštantná} \quad (12)$$

Niektoré difúzne výpočty sú tak uľahčené na základe tohto vzťahu.

FAKTORY, KTORÉ OVPLYVŇUJÚ DIFÚZIU

Difúzne častice

Veľkosť difúzneho koeficientu D je indikátorom rýchlosti, akou atómy difundujú. Koeficienty, samodifúzne a aj interdifúzne, pre niekoľko kovových systémov sú uvedené v **Tab.2**. Difúzne častice, ako aj materiál hostiteľa ovplyvňujú difúzny koeficient. Napríklad existuje značný rozdiel v rozsahu medzi samodifúziou a interdifúziou uhlíka v Fe_α pri $500^\circ C$, hodnota D je vyššia pre interdifúziu uhlíka ($3,0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$ oproti $2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Toto porovnanie tiež poskytuje kontrast medzi rýchlosťami difúzie skrz vakančnými a intersticiálnymi režimami. Samodifúzia nastáva vakančným mechanizmom, zatiaľ čo difúzia uhlíka v železe je intersticiálna.

Tab.2 Tabuľka difúzných údajov

Difúzne časti	Hostiteľský kov	$D_0 \text{ (m}^2/\text{s)}$	Aktivačná energia		Vypočítaná hodnota	
			(kJ/mol)	(eV/atom)	$T \text{ (}^\circ C)$	$D \text{ (m}^2/\text{s)}$
Fe	Fe_α (BCC)	$2,8 \cdot 10^{-4}$	251	2,60	500	$3,0 \cdot 10^{-21}$
					900	$1,8 \cdot 10^{-15}$
Fe	Fe_γ (FCC)	$5,0 \cdot 10^{-5}$	284	2,94	900	$1,1 \cdot 10^{-17}$
					1100	$7,8 \cdot 10^{-16}$
C	Fe_α (BCC)	$6,2 \cdot 10^{-7}$	80	0,83	500	$2,4 \cdot 10^{-12}$
					900	$1,7 \cdot 10^{-10}$
C	Fe_γ (FCC)	$2,3 \cdot 10^{-5}$	148	1,53	900	$5,9 \cdot 10^{-12}$
					1100	$5,3 \cdot 10^{-11}$
Cu	Cu	$7,8 \cdot 10^{-5}$	211	2,19	500	$4,2 \cdot 10^{-19}$
Zn	Cu	$2,4 \cdot 10^{-5}$	189	1,96	500	$4,0 \cdot 10^{-18}$
Al	Al	$2,3 \cdot 10^{-4}$	144	1,49	500	$4,2 \cdot 10^{-14}$
Cu	Al	$6,5 \cdot 10^{-5}$	136	1,41	500	$4,1 \cdot 10^{-14}$
Mg	Al	$1,2 \cdot 10^{-4}$	131	1,35	500	$1,9 \cdot 10^{-13}$
Cu	Ni	$2,7 \cdot 10^{-5}$	256	2,65	500	$1,3 \cdot 10^{-22}$

Teplota

Teplota má najväčší vplyv na koeficienty a rýchlosti difúzie. Napríklad pre samodifúziu Fe v Fe_α sa difúzny koeficient zvyšuje približne o šesť rádov (z $3,0 \cdot 10^{-21}$ na $1,8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$) pri zvyšovaní teploty z $500^\circ C$ na $900^\circ C$ (**Tab.2**). Teplotná závislosť difúzných koeficientov je daná:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{R \times T}\right) \quad (13)$$

kde D_0 je teplotne nezávislý preexponenciál (m^2/s), Q_d je aktivačná energia pre difúziu (J/mol alebo eV/atóm), R je plynová konštanta ($8,31 \text{ J/mol.K}$ alebo $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/atom.K}$) a T je absolútna teplota (K).

Aktivačnú energiu možno považovať za energiu potrebnú na vytvorenie difúzneho pohybu jedného mólu atómov. Výsledkom veľkej aktivačnej energie je relatívne malý difúzny koeficient. **Tab.2** obsahuje aj zoznam hodnôt D_0 a Q_d pre niekoľko difúzných systémov.

Prirodzený logaritmus predchádzajúcej rovnice je:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q_d}{R} \times \left(\frac{1}{T}\right) \quad (14)$$

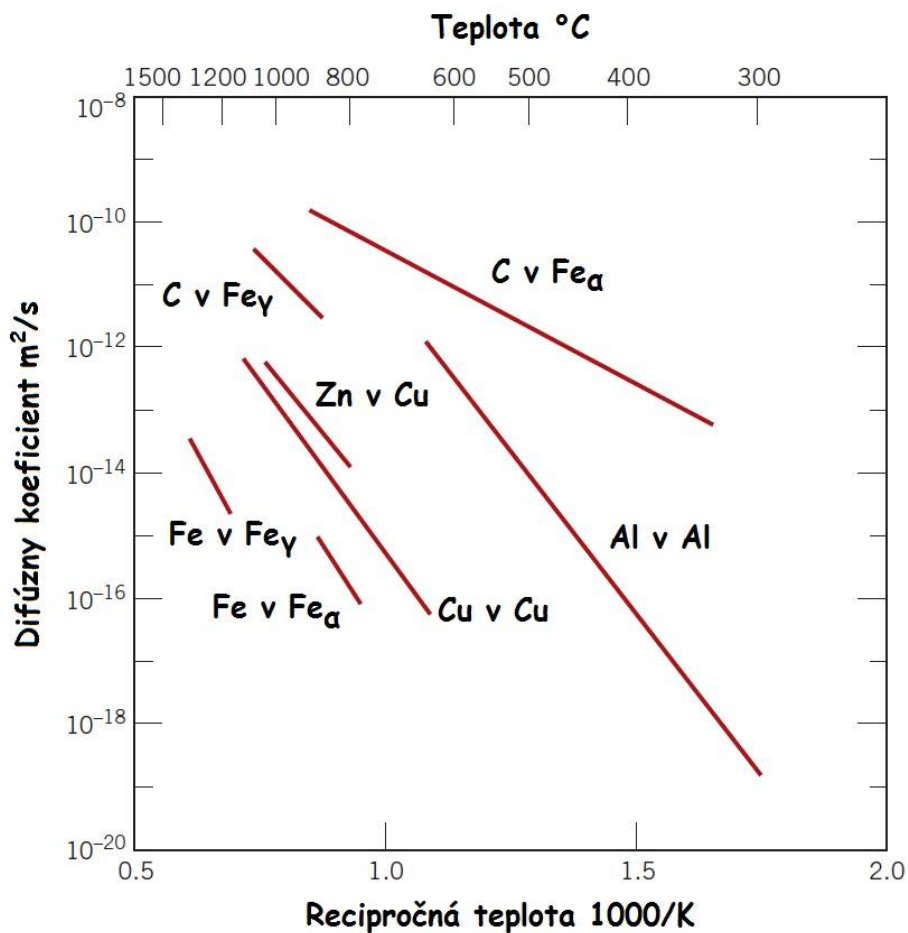
alebo, pokiaľ ide o logaritmy so základom 10, tak potom:

$$\log D = \log D_0 - \frac{Q_d}{2,3 \times R} \times \left(\frac{1}{T}\right) \quad (15)$$

Pretože D_0 , Q_d a R sú konštanty, rovnica nadobúda tvar rovnice priamky:

$$y = b + m \times x \quad (16)$$

kde y a x sú analogické s premennými $\log D$ a $1/T$. Ak je teda $\log D$ vynesení v závislosti od prevrátenej hodnoty absolútnej teploty, mala by vzniknúť priamka, ktorá má sklon, zostavená z $Q_d/2,3.R$ a $\log D_0$. Toto je v skutočnosti spôsob, ktorým sa experimentálne určujú hodnoty Q_d a D_0 . Z takéhoto grafu pre niekoľko zliatinových systémov (**Obr.8**) je možné poznamenať, že pre všetky zobrazené prípady existujú lineárne vzťahy.



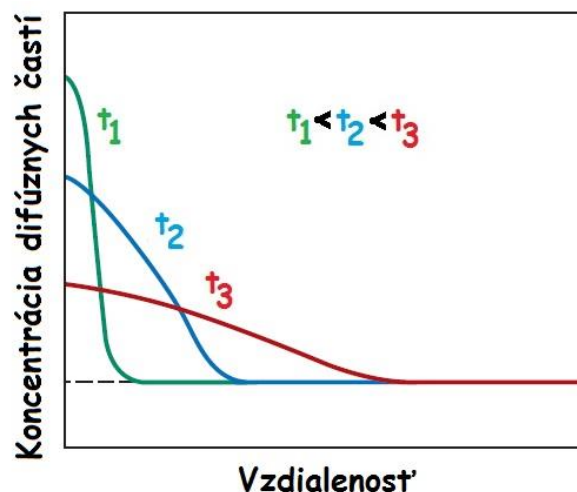
Obr.8 Graf logaritmu difúzneho koeficientu v závislosti od prevrátenej hodnoty absolútnej teploty pre niekoľko kovov.

DIFÚZIA V POLOVODIVÝCH MATERIÁLOCH

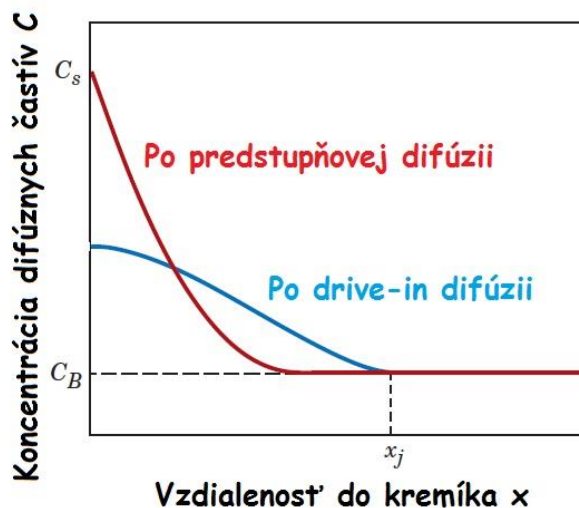
Jednou z technológií, ktorá uplatňuje difúziu v pevnom stave, je výroba polovodičových integrovaných obvodov (IC). Každý čip integrovaného obvodu je tenká štvorcová doštička, ktorá má rozmery rádovo 6 mm x 6 mm x 0,4 mm a má zabudované milióny vzájomne prepojených elektronických zariadení a obvodov. Monokryštál kremíka je základným materiálom pre väčšinu integrovaných obvodov. Aby tieto IC zariadenia fungovali, musia byť do malých priestorových oblastí začlenené veľmi presné koncentrácie prímiesi vo veľmi zložitom a podrobnom vzore na kremíkovom čipe. Jedným zo spôsobov, ako sa to dá dosiahnuť, je atómová difúzia.

Zvyčajne sa v tomto procese používajú dve tepelné úpravy. V prvom (*predstupňovom*) kroku sú atómy prímiesi rozptýlené do kremíka, často z plynnej fázy, ktorej parciálny tlak je konštantne udržiavaný. Povrchové zloženie prímiesi teda tiež zostáva konštantné v čase, takže koncentrácia prímiesi v kremíku je funkciou polohy a času. Toto sa zvyčajne vykonáva v rozmedzí teplôt 900°C až 1 000°C a po dobu obvykle kratšiu ako jedna hodina.

Druhé spracovanie, niekedy nazývané *drive-in* difúzia, sa používa na transport atómov prímiesi ďalej do kremíka, aby sa zaistilo vhodnejšie rozdelenie koncentrácie bez zvýšenia celkového obsahu prímiesi. Toto ošetrenie sa uskutočňuje pri vyššej teplote ako je teplota pred nanosením (do asi 1200°C) a tiež v oxidačnej atmosfére tak, aby sa na povrchu vytvorila vrstva oxidu. Rýchlosti difúzie cez túto vrstvu SiO₂ sú pomerne nízke, takže len veľmi málo atómov prímiesi difunduje z kremíka a uniká z neho. Schematické koncentračné profily urobené v troch rôznych časoch pre túto difúziu situáciu sú znázornené na **Obr.9**, kde tieto profily je možné porovnať a porovnať s profilmi na **Obr.6** pre prípad, keď je povrchová koncentrácia difúzných častí udržiavaná na konštantnej hodnote. **Obr.10** porovnáva (schematicky) koncentračné profily pre predstupňové a *drive-in* spracovanie.



Obr.9 Schematické koncentračné profily pre *drive-in* difúziu polovodičov v troch rôznych časoch (t_1 , t_2 a t_3).



Obr.10 Schematické koncentračné profily urobené po (1) predstupňovom a (2) drive-in difúznom spracovaní pre polovodiče. Zobrazená je aj spojovacia hĺbka x_j .

Ak vychádzame z toho, že atómy prímiesi zavedené počas úpravy pred nanosením sú stiesnené na veľmi tenkej vrstve na povrchu kremíka, potom riešenie druhého Fickovho zákona má formu:

$$C(x, t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi \times D \times t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \times D \times t}\right) \quad (17)$$

Q_0 tu predstavuje celkové množstvo prímiesi v tuhej látke, ktoré sa zaviedli počas prestupňovej úpravy (v počte atómov prímiesi na jednotku plochy). Všetky ostatné parametre v tejto rovnici majú rovnaký význam ako predtým. Ďalej je možné preukázať, že

$$Q_0 = 2 \times C_s \sqrt{\frac{D_p \times t_p}{\pi}} \quad (18)$$

kde C_s je *povrchová koncentrácia* pre predstupňový krok (**Obr.10**), ktorá sa udržiavala na konštantnej hodnote, D_p je *koefficient difúzie* a t_p je *čas predstupňového spracovania*.

Ďalším dôležitým parametrom difúzie je spojovacia hĺbka, x_j . Predstavuje hĺbku, v ktorej sa koncentrácia difúznej prímiesi rovná koncentrácii prímiesi v kremíku (C_B) (**Obr.10**).

Pre drive-in difúziu možno x_j vypočítať pomocou nasledujúceho výrazu:

$$x_j = \left[(4 \times D_d \times t_d) \ln\left(\frac{Q_0}{C_B \sqrt{\pi \times D_d \times t_d}}\right) \right]^{1/2} \quad (19)$$

tu D_d a t_d predstavujú difúzny koefficient a čas pre drive-in spracovanie.

PRÍKLAD 1

Doska zo železa je vystavená nauhličovacej atmosfére (na uhlík bohatej) na jednej strane a oduhličovacej atmosfére (s nedostatkom uhlíka) na druhej strane pri 700°C. Ak sa dosiahne podmienka ustáleného stavu, vypočítajte difúzny tok uhlíka cez dosku, ak sú koncentrácie uhlíka v polohách 5 a 10 mm pod nauhličovacím povrchom 1,2 a 0,8 kg/m³. Pri tejto teplote predpokladajme difúzny koeficient 3.10⁻¹¹ m²/s.

PRÍKLAD 2

Pri niektorých súčiastkach je potrebné kaliť povrch ocele (zliatiny železa a uhlíka). Jedným zo spôsobov, ako to možno dosiahnuť, je zvýšenie povrchovej koncentrácie uhlíka v procese nazývanom nauhličovanie. Oceľový kus je pri zvýšenej teplote vystavený atmosfére bohatej na plynný uhľovodík, ako je metán (CH₄). Uvažujte nad jednou takou zliatinou. Na začiatku má jednotnú koncentráciu uhlíka 0,25 hmotn.%. A má byť upravená pri 950°C. Ak sa koncentrácia uhlíka na povrchu náhle zvýši a udržuje na 1,20 hmotn.%, ako dlho bude trvať, kým sa v hĺbke 0,5 mm pod povrchom dosiahne obsah uhlíka 0,80 hmotn.%? Difúzny koeficient pre uhlík v železe pri tejto teplote je 1,6.10⁻¹¹ m²/s. Predpokladajme, že oceľový kus je polonekonečný.

PRÍKLAD 3

Difúzne koeficienty pre meď v hliníku pri 500°C a 600°C sú 4,8.10⁻¹⁴ m²/s, respektíve 5,3.10⁻¹³ m²/s. Určte približný čas pri 500°C, ktorý poskytne rovnaký výsledok difúzie (z hľadiska koncentrácie Cu v určitom špecifickom bode v Al) ako 10 hodinové tepelné spracovanie pri 600°C.

PRÍKLAD 4

Pomocou údajov z Tab.2 vypočítajte difúzny koeficient pre horčík v hliníku pri 550 ° C.

PRÍKLAD 5

Odolnosť proti opotrebeniu oceľového prevodu sa má zlepšiť spevnením jeho povrchu. Toto sa musí dosiahnuť zvýšením obsahu uhlíka vo vonkajšej povrchovej vrstve v dôsledku difúzie uhlíka do ocele, uhlík sa má dodávať z vonkajšej plynnej atmosféry bohatej na uhlík pri zvýšenej a stálej teplote. Počiatočný obsah uhlíka v oceli je 0,20 hmotn.%, zatiaľ čo povrchová koncentrácia sa má udržiavať na 1,00 hmotn.%. Aby bolo toto ošetrenie účinné, musí sa stanoviť obsah uhlíka 0,60 hmotn.% v hĺbke 0,75 mm pod povrchom. Uveďte vhodné tepelné ošetrenie z hľadiska teploty a času pre teploty medzi 900 a 1050°C (zvyšujte po 25°C). Použite údaje z Tab.2 na difúziu uhlíka v Fe_γ.

PRÍKLAD 6

Atómy bóru sa majú difundovať do kremíkovej doštičky pomocou predstupňového a drive-in tepelného spracovania, ak je známe, že koncentrácia B v tomto kremíkovom materiáli je 1.10²⁰ atómov/m³. Predstupňové spracovanie sa má uskutočniť pri 900°C po dobu 30 minút a povrchová koncentrácia B sa má udržiavať na konštantnej úrovni 3.10²⁶ atómov/m³. Drive-in difúzia sa bude uskutočňovať pri 1100°C po dobu 2 hodín. Pre difúzny koeficient B v Si sú hodnoty Q_d 3,87 eV/atóm a D_0 2,4.10⁻³ m²/s.

- Vypočítajte hodnotu Q_d . (Pre plynovú konštantu R použite Boltzmannovu konštantu k , ktorá má hodnotu 8,62.10⁻⁵ eV /atóm.K)
- Určte hodnotu x_j pre drive-in difúzne spracovanie.
- Vypočítajte koncentráciu atómov B v hĺbke 1μm pod povrchom kremíkovej doštičky, tiež pre drive-in difúzne spracovanie.