



# MAŠINSKI MATERIJALI

Osnovi faznih promena u  
metalnim sistemima Difuzija



# Sadržaj

- Difuzija
- Intersticijska difuzija
- Supstitucijska difuzija
- Prvi Fickov zakon
- Koeficijent difuzije mera brzine difuzije na konstantnoj temperaturi, zavisi od temperature i aktivacione energije
- Inverzna difuzija nagomilavanje atoma rastvorene supstance na pojedinim mestima kristalne rešetke rastvarača (legure aluminijuma sa bakrom-duraluminijum)

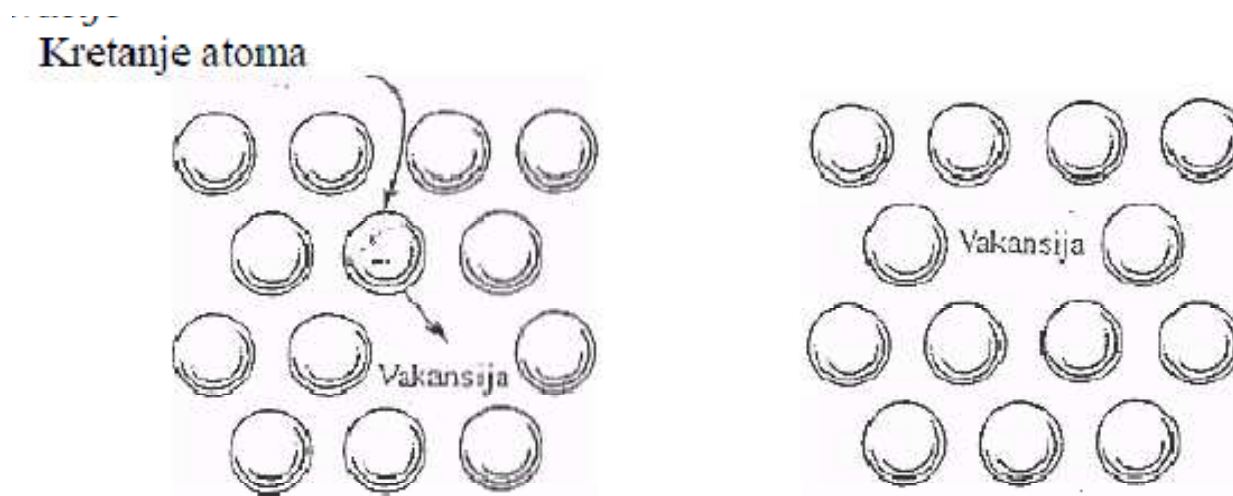


# Difuzija

- **Definicija:** Difuzija je mehanizam kojim se materija prenosi kroz materiju.
- U gasovima kretanje atoma je relativno brzo, kao što to pokazuje brzina širenja mirisa iz kuhinje ili čestica dima duvana.
- Kretanje atoma u tečnostima su uopšteno sporija nego u gasovima, kao što to pokazuje kretanje kontrastne boje u tečnoj vodi.
- U čvrstim telima kretanja atoma su ograničena zbog vezivanja za ravnotežne položaje.
- Primeri reakcija u čvrstom stanju su:
  - Taloženje sekundarne faze iz čvrstog rastvora
  - Stvaranje klica i rast novih zrna pri rekristalizaciji hladno obradjenog metala.

# Difuzija mehanizmom praznina ili supstitucijskim mehanizmom

Difuzija i samodifuzija, vakanski(supstitucijski) mehanizam, intersticijski mehanizam, energije aktivacije



Slika – Vakanski mehanizam difuzije

# Mehanizmi difuzije

Postoje dva osnovna mehanizma difuzije atoma u kristalnoj rešetki:

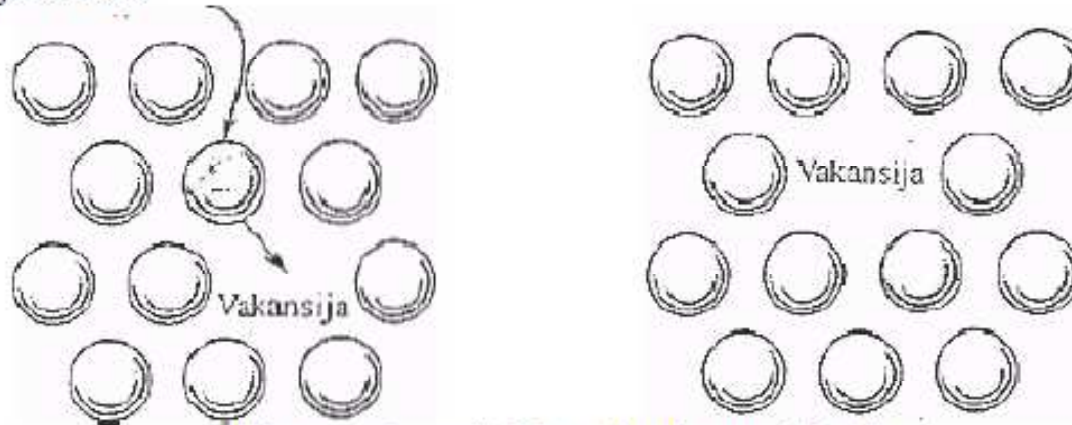
1. Mehanizam praznina ili supstitucioni mehanizam difuzije
2. Intersticijski mehanizam difuzije

Difuzija može nastati mehanizmom praznina u čvrstim rastvorima.

Faktori koji utiču na brzinu difuzije:

- razlika u veličini atoma i
- razlika u energiji veza između atoma.

Kretanje atoma



Slika – Vakanski mehanizam difuzije

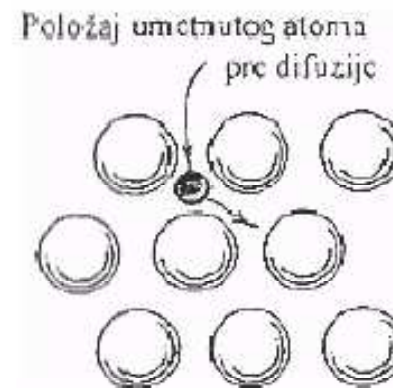
# Intersticijski mehanizam difuzije

Intersticijska difuzija atoma u kristalnim rešetkama nastaje kad se atomi kreću od jednog intersticijskog mesta u drugo susedno intersticijsko mesto bez trajnog pomeranja nekog od atoma u osnovnoj kristalnoj rešetki.

Da bi se ispoljio intersticijski mehanizam, veličina difundujućih atoma mora biti relativno mala u odnosu na atome osnove.

Primer ugljenik može intersticijski da difunduje u prost-c-k alfa železu i pov-c-k gama železu.

Difuzija kod metala i legura: kroz zapreminu; po granicama metalnog zrna



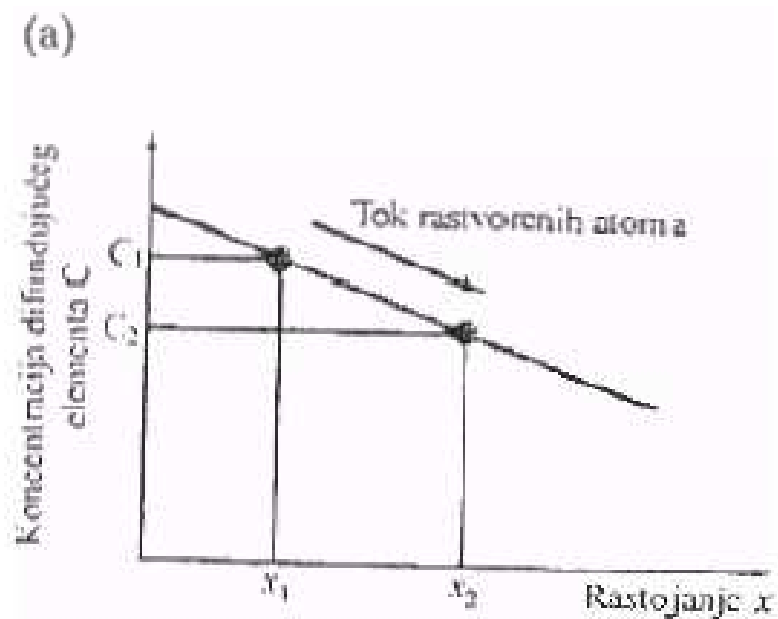
Slika – Intersticijski mehanizam difuzije

# Difuzija pri stacionarnom stanju

## Uslovi stacionarnog stanja

Ne postoji promena u koncentraciji rastvorenih atoma u ravnima za sistem u toku vremena.

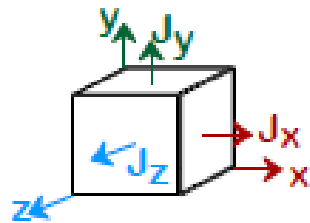
Primer; Nereaktivni gas difunduje kroz metalnu foliju.



Slika a) Stacionarni sistem difuzije

# Prvi Fickov zakon difuzije

**Prvi Fickov zakon difuzije:** važi za stacionarno stanje difuzije, brzina difuzije atoma rastvorenog elementa među atomima posmatrane materije meri se masenim tokom  $J$ , definisan kao broj atoma koji prolaze kroz jedinicu površine, normalne na pravac toka, u jedinici vremena.



$$J_x = -D \frac{dC}{dx}$$

$D$ -koeficijent difuzije,  $m^2/s$

$dc/dx$ - gradijent koncentracije,  $kg/m^4$

Maseni tok atoma-  $J_x$  proporcionalan je gradijentu koncentracije  $(C_2-C_1)/(X_2-X_1)$  ( $atom/m^3m$ )

**Negativan predznak pokazuje da je smer difuzije od više prema nižoj koncentraciji.**



# Vrednosti koeficijenta difuzije

Tabela – Vrednosti koeficijenta difuzije

Rastvoren element	Osnovni element	Koeficijent difuzije, $D$ (m <sup>2</sup> /s)	
		500°C	1000°C
Ugljenik	Železo (KPC)	$5 \times 10^{-15}$	$3 \times 10^{-11}$
Ugljenik	Železo (KZC)	$10^{-12}$	$2 \times 10^{-9}$
Železo	Železo (KPC)	$2 \times 10^{-23}$	$2 \times 10^{-16}$
Železo	Železo (KZC)	$10^{-20}$	$3 \times 10^{-14}$
Nikal	Železo (KPC)	$10^{-23}$	$2 \times 10^{-16}$
Magnezijum	Železo (KPC)	$3 \times 10^{-24}$	$10^{-16}$
Bakar	Bakar	$10^{-18}$	$2 \times 10^{-13}$
Bakar	Aluminijum	$4 \times 10^{-14}$	$10^{-10}$
Srebro	Srebro (kristal)	$10^{-17}$	$10^{-12}$
Srebro	Srebro (granica zrna)	$10^{-11}$	
Ugljenik	Titan (HGP)	$3 \times 10^{-16}$	$2 \times 10^{-11}$



# Koeficijent difuzije

- Vrednost koeficijenta difuzije zavisi od sledećih veličina:
- Vrste mehanizma difuzije
- Temperature na kojoj se vrši difuzija
- Vrste kristalne strukture rešetke rastvarača
- Vrste kristalnih grešaka koje postoje
- Koncentracija vrste atoma koja vrši difuziju

# Koeficijent difuzije- D

Koeficijent difuzije za dati par elemenata najviše zavisi od temperature.

Koeficijent difuzije na različitim temperaturama mnogih materijala može se odrediti jednačinom:

$$D_{(T)} = D_0 e^{-Q/RT}$$

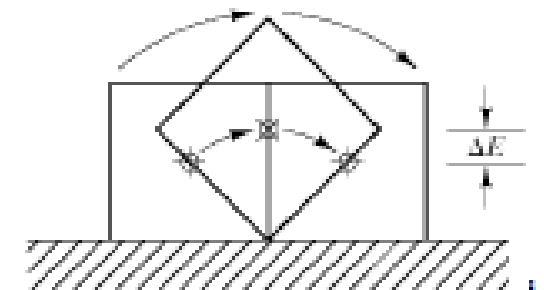
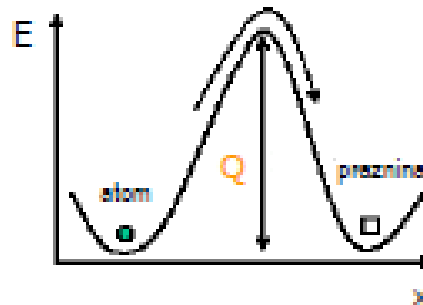
$D_{(T)}$ - koeficijent difuzije na temperaturi T

$D_0$ - konstanta, temperaturno nezavisna,  $m^2/s$

R- opšta gasna konstantna,  $8,31 \text{ J/mol.K}$

T- apsolutna temperatura, K

Q-energija aktivacije difuzije, J/mol



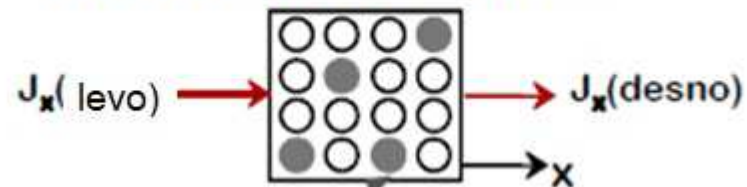
# Vrednosti koeficijenta proporcionalnosti i energije aktivacije za neke difuzione sisteme

Tabela – Vrednosti koeficijenta proporcionalnosti i energije aktivacije za neke difuzione sisteme

Rastvoren element	Element rastvarač	$D_0$ (m <sup>2</sup> /s)	$Q$ (kJ/mol)
Ugljenik	Železo (KPC)	$2,0 \times 10^{-5}$	142
Ugljenik	Železo (KZC)	$22,0 \times 10^{-5}$	122
Železo	Železo (KPC)	$2,2 \times 10^{-5}$	268
Železo	Železo (KZC)	$20,0 \times 10^{-5}$	240
Nikal	Železo (KPC)	$7,7 \times 10^{-5}$	280
Magnezijum	Železo (KPC)	$3,5 \times 10^{-5}$	282
Bakar	Aluminijum	$1,5 \times 10^{-5}$	126
Bakar	Bakar	$2,0 \times 10^{-5}$	197
Srebro	Srebro	$1,0 \times 10^{-5}$	184
Ugljenik	Titan (HGP)	$51,0 \times 10^{-5}$	182

# PRVI FICKOV ZAKON

## PRVI FICK-OV ZAKON



$$J_x(\text{levo}) = J_x(\text{desno})$$

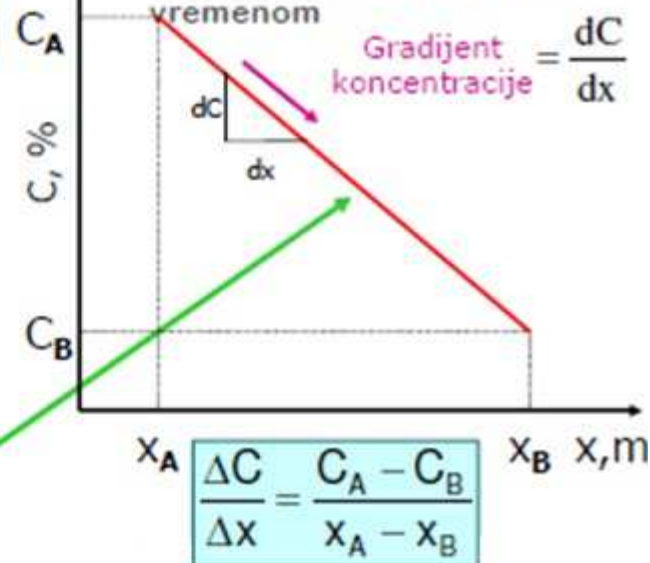
**stacionarna difuzija**

$$J_x = -D \frac{dC}{dx}$$

$$\left( \frac{dC}{dx} \right)_{\text{levo}} = \left( \frac{dC}{dx} \right)_{\text{desno}}$$

Odnos(nagib)  
koncentracija se ne menja

Koncentracija,  $C$ , se u  
označenom polju ne menja s  
vremenom





# Difuzija pri nestacionarnom stanju

- Koncentracija rastvorenih atoma u nekoj tački u materijalu **menja se sa vremenom**.
- Primer: Ako ugljenik difunduje u površinu čelične bregaste osovine radi otvrdnjavanja njene površine u nekoj tački menjaće se sa vremenom kako napreduje proces difuzije.
- Koeficijent difuzije nezavisan od vremena pri nestacionarnim uslovima.

# Nestacionarni sistem difuzije

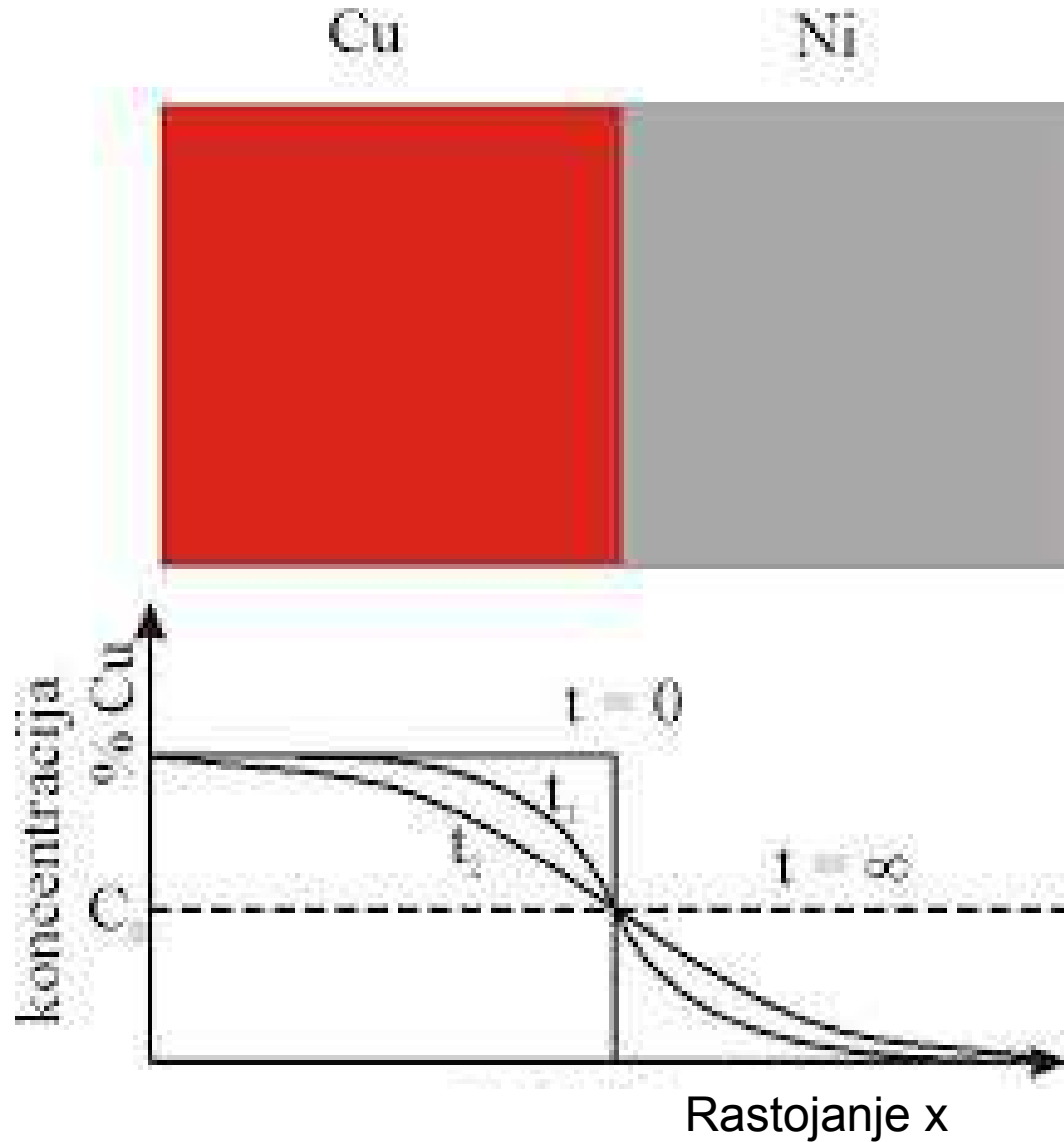
- Gradijent koncentracije se menja sa promenom vremena i odredjen je **Drugim Fickovim zakonom**:

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D \frac{dC}{dt} \right) = D \frac{d^2 C}{dt^2}$$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = fgg \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

gde su:  $C_s$ –koncentracija elementa na površini;  $C_o$ –početna koncentracija elementa u čvrstom telu;  $C_x$ –koncentracija elementa na rastojanju  $x$  u vremenu  $t$ ;  $x$ –rastojanje od površine;  $D$ –koeficijent difuzije;  $t$ –vreme;  $fgg$ –Gausova funkcija greške.

# Nestacionarni sistem difuzije







# Kratak pregled

- Difuzija atoma nastaje u metalnim čvrstim telima putem mehanizma praznina i intersticijskim mehanizmom.
- Prema Prvom Fikovom zakonu difuzije, difuzija nastaje zbog razlike koncentracije difundujućih vrsta atoma od jednog mesta do drugog i može se primeniti za uslove stacionarnog stanja (tj. uslovi koji se ne menjaju sa vremenom)
- Gradijent koncentracije se menja sa promenom vremena i odredjen je drugim Fikovim zakonom.