



اصول و کاربردهای علم مواد در مهندسی مکانیک

فصل هفتم:
نفوذ

اصول علم مواد - دکتر فخری

1 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مقدمه

- جابجایی گام به گام اتمها برای رسیدن به حالت همگن را در گازها، مایعات و جامدات را نفوذ گویند.
- نفوذ یکی از فعل و انفعالات مهم در انجماد و دگرگونیهای فازها در حالت جامد است. اختلاف غلظت اتمی در بین قسمت‌های یک بلور، علت اصلی حرکت اتمها در فرآیند نفوذ است.

اصول علم مواد - دکتر فخری

2 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




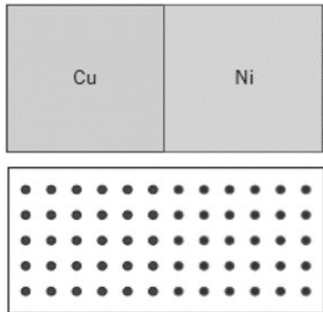
پدیده نفوذ

- پدیده نفوذ میتواند توسط اتصال دو فلز خالص با جنس متفاوت به یکدیگر اثبات شود.
- در شکل دو میله از جنس نیکل و مس در تماس با یکدیگر بوده و نمودار مکان-غلظت اتمی آنها نیز رسم شده است. مدت کمی حرارت داده و سپس خنک می‌شوند.
- هنگام گرم شدن، اتمهای این دو فلز به سمت میله دیگر حرکت کرده (اتمهای مس به سمت میله نیکل و بالعکس) در آن نفوذ می‌کنند بطوریکه در دو انتهای میله مس و نیکل خالص در محل تماس آنها، منطقه آلیاژی از هر دو فلز تشکیل شده است.
- تشکیل این منطقه آلیاژی به دلیل پدیده نفوذ است. این نوع به نفوذ در دیگری یا نفوذ ناخالصی، معروف است.

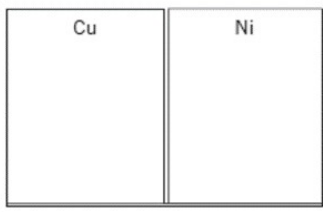
3

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

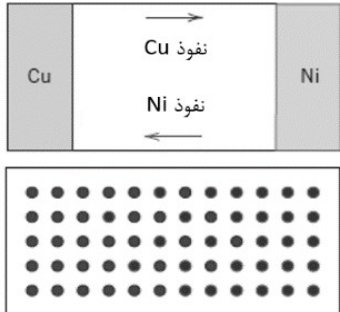




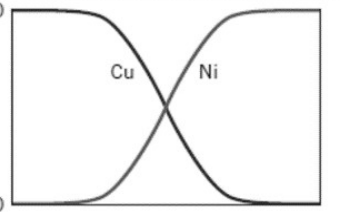
100
غلظت مس و نیکل



مکان



100
غلظت مس و نیکل



مکان

4

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نفوذ در خود

- از دیدگاه میکروسکوپی، نفوذ در دیگری را از تغییر غلظت اتمهای ماده می توان تشخیص داد.
- همیشه یک جریان اتمی از منطقه با غلظت بالا به منطقه با غلظت پایین وجود دارد.
- این جریان برای مواد از یک جنس یا یک نوع اتم نیز وجود دارد.
- حرکت اتمها از منطقه با چگالی بالا به سمت منطقه با چگالی پایین در یک ماده را، نفوذ در خود گویند.

5

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مکانیسمهای نفوذ

- در دیدگاه اتمی، نفوذ مهاجرت و انتقال اتمها از جایگاهی در شبکه بلوری یک جایگاه دیگر است.
- در واقع این حرکت دائمی در جامدها همیشه وجود دارد. اتمی که خواهد چنین جابجایی را انجام دهد باید دو شرط داشته باشد:
- باید در کنار آن یک جای خالی وجود داشته باشد.
- انرژی کافی برای شکستن پیوند با اتمهای مجاور خود و ایجاد مقداری اعوجاج در شبکه بلوری حین جابجایی را داشته باشد.

6

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1


در هر دمایی درصد کمی از کل اتم‌ها قادر به حرکت نفوذی هستند. با افزایش دما و افزایش انرژی جنبشی اتم‌ها، این درصد افزایش می‌یابد. نفوذ معمولاً با دو مکانیسم نفوذ جای خالی و نفوذ بین‌نشینی انجام می‌شود.

7 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

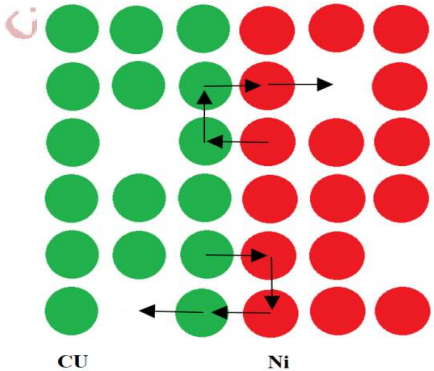
نفوذ جای خالی‌ها

- یکی از مکانیسم‌های نفوذ، شامل جابجا شدن اتم از موقعیت فعلی به جای خالی موجود در شبکه بلوری مجاور خود است.
- مسلماً درصد وقوع این نوع نفوذ در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. در مکانیسم نفوذ جای خالی، نفوذ اتم در یک‌جهت مصادف است با حرکت جای خالی در جهت عکس. نفوذ در خود و نفوذ در هم با این مکانیسم روی می‌دهد.

8 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



• نفوذ اتمهای نیکل در میله مسی و بالعکس مثالی از این نوع نفوذ است.




9 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نفوذ بین نشینی

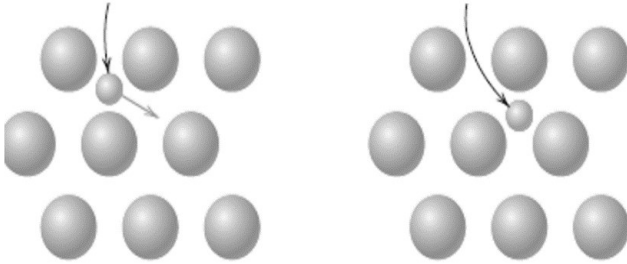
- در این نفوذ، اتمهای بین نشینی، از یک موقعیت به فضای خالی بین اتمهای مجاور خود حرکت می‌کنند. این مکانیسم برای نفوذ در دیگری، اتمهای ناخالص کوچک مثل اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن و کربن که دارای قطراتمی کوچکی هستند، صورت می‌گیرد.
- نفوذ اتمهای میزبان در خود یا اتمهای ناخالص جانشینی بندرت توسط این مکانیسم صورت می‌گیرد.
- در آلیاژهای فلزی، نفوذ بین نشینی بسیار سریع‌تر از نفوذ جای خالی روی می‌دهد زیرا:
- اتمهای ناخالص بین نشینی اتمهای کوچکی هستند و راحت‌تر جابجا می‌شوند.
- تعداد فضای خالی بین‌اتمی بسیار بیشتر از تعداد فضای خالی موجود در شبکه بلوری ماده است.

10 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1




مکان اتم بین نشین قبل از نفوذ

مکان اتم بین نشین بعد از نفوذ



اصول

11 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



قوانین نفوذ

- شار نفوذ

نفوذ یک پدیده وابسته به زمان است. نرخ جابجایی جرم در نفوذ بیانگر سرعت نفوذ است که تحت عنوان شار نفوذ بیان شده و با حرف J بیان می شود. شار نفوذ برابر میزان جرم (M) یا تعداد اتم هایی است که از واحد سطح مقطع جامد در واحد زمان عبور می کند.

$$J = \frac{M}{At} \quad (1)$$

A سطح مقطع و t زمان نفوذ است. فرم دیفرانسیل این رابطه به صورت زیر است:

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

واحد شار نفوذ $\text{atoms}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ یا $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ است.

اصول علم مواد

12 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نفوذ و قوانین فیک

- پدیده نفوذ اتمی بسیار شبیه پدیده نفوذ حرارت یا انتقال حرارت است.
- در مدل سازی پدیده نفوذ اتمی از قوانین اول و دوم فیک استفاده می شود. روابط انتقال حرارت و نفوذ در زیر آمده است. در روابط زیر J شار نفوذ اتمی و V شار حرارتی است. همچنین T دما و C غلظت اتمها است. در هر دو حالت، عامل نفوذ اختلاف غلظت یا دما است. D و C ثابت نفوذ و k ضریب انتقال حرارت است.

نفوذ	انتقال حرارت
$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$	$V = -k \frac{\partial T}{\partial x}$
$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$	$\frac{\partial T}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

13

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



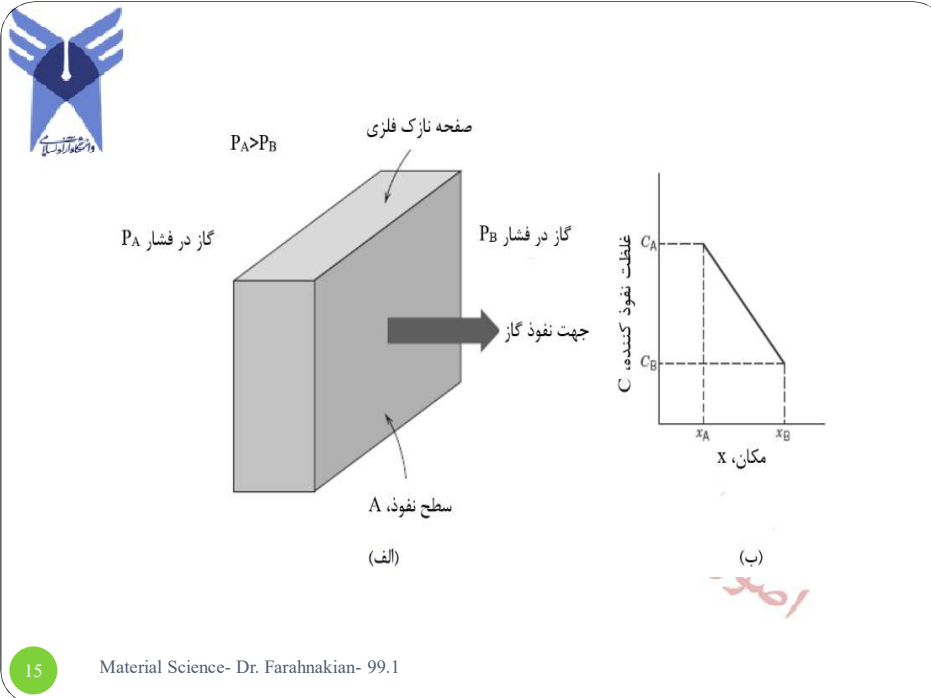
نفوذ پایا - قانون اول فیک

- اگر شار نفوذ نسبت به زمان تغییر نکند، پدیده نفوذ پایا روی می دهد.
- یک مثال عملی از نفوذ پایدار، تصفیه اتمهای گازی به وسیله نفوذ آنها از یک صفحه نازک فلزی به صورت پایدار است که فشار طرفین ورق ثابت نگه داشته شود
- چنانچه غلظت اتمهای گاز نفوذ کرده داخل فلز بر حسب ضخامت ترسیم شود، منحنی غلظت به دست می آید، که به شیب این منحنی گرادیان غلظت گویند.

$$\frac{dC}{dx} = \text{گرادیان غلظت}$$

14

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



The diagram shows a rectangular metal slab with a concentration gradient. The left face is labeled 'A' and the right face is labeled 'B'. The pressure on the left is P_A and on the right is P_B , with $P_A > P_B$. An arrow indicates the direction of gas diffusion from left to right. A graph to the right shows concentration C on the y-axis and position x on the x-axis. The concentration is constant at C_A from $x=0$ to x_A , then decreases linearly to C_B at x_B .

(الف)

(ب)

اصول علم

15 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

مطابق شکل قبلی، در نفوذ پایا منحنی غلظت خطی و گرادیان غلظت ثابت است. واحد غلظت kg/m^3 است. شار نفوذ (J) در حالت نفوذ پایا در حالت یک بعدی، طبق قانون اول فیک، به گرادیان غلظت مربوط می شود:

$$(3) \quad \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial x} = cte \Rightarrow \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

D ثابت نفوذ نام دارد و واحد آن m^2/s است. علامت منفی نشان می دهد که جهت نفوذ برخلاف افزایش غلظت است.

یعنی عامل و نیروی محرک برای نفوذ اتمی، اختلاف غلظت اتمها در دو منطقه مجاور یکدیگر است.

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

اصول علم

16 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



مثال: در طرفین یک ورق آهنی در دمای 700°C کربن با دو غلظت متفاوت وجود دارد. غلظت کربن در فواصل ۵ و ۱۰ mm از سطح آهن در قسمت پرفشار برابر با ۰/۸ و $1/2 \text{ kg/m}^3$ است. با فرض نفوذ پایا، شار نفوذ را محاسبه نمایید. ثابت نفوذ برابر $3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ است.

$$J = -D \frac{C_A - C_B}{X_A - X_B} = -3 \times 10^{-2} \frac{12 - 0.8}{(5 - 10) \times 10^{-3}} = 2.4 \times 10^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

17

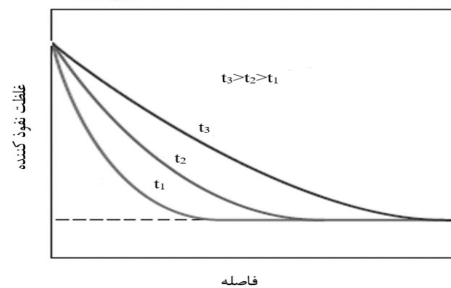
Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



نفوذ نا پایا (گذرا) - قانون دوم فیک


در اغلب موارد عملی، نفوذ به صورت ناپایا (گذرا) است. یعنی شار نفوذ و گرادیان غلظت در یک نقطه خاص از ماده نسبت به زمان متغیر است. در حالت نفوذ گذرا از قانون دوم فیک برای محاسبه گرادیان غلظت استفاده می شود:

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



18

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- رابطه بالا یک معادله دیفرانسیل جزئی است و در آن غلظت تابعی از زمان و مکان است که دقیقاً مشابه انتقال حرارت یک بعدی است. حل معادله بالا با توجه به شرایط مرزی و اولیه حاکم بر مسئله امکان پذیر است.


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

- یکی از موارد مهم عملی از نفوذ ناپایا، حالتی است که یک جسم نیم بی نهایت در سطح خود در معرض اتم‌های ناخالص با غلظت ثابت (فشار ثابت) قرار گیرد
- منظور از ماده نیم بی نهایت در مهندسی، جسمی است که هیچ یک از اتم‌های نفوذکننده، در طی مدت زمان نفوذ به انتهای آن نرسند. چنانچه طول ماده L باشد، شرط نیم بی نهایت آن است که:

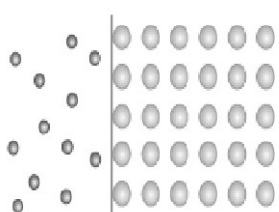
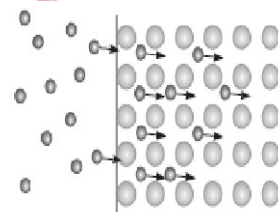
$$L > 10\sqrt{Dt}$$

اصول علم مواد

19 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



- اگر شرایط زیر برقرار باشد، در این حالت می توان قانون دوم فیک را حل نمود:
- قبل از نفوذ، اتم‌های نفوذکننده در کل ماده یکنواخت توزیع شده باشند (غلظت اولیه C_0).
- محور مختصات X در سطح خارجی ماده قرار دارد.
- زمان در لحظه شروع نفوذ صفر است.

اصول علم مواد

20 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

در کل چنانچه شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر باشد:

$$t=0, C=C_0 \text{ at } 0 \leq x < \infty$$

$$t>0, C=C_1 \text{ at } x=0$$

$$t>0, C=C_0 \text{ at } x=\infty$$

در این حالت، غلظت به صورت تابعی از مکان و زمان به دست می آید:

$$\frac{C_x - C_0}{C_1 - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (6)$$

که در آن $0 < \operatorname{erf}(z) < 1$ تابع خطای گوس است. نمودار تابع خطای گوس برای مقادیر مختلف z در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است.


21 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

مثال

- در برخی کاربردها لازم است تا سطح فولاد سخت شود. یکی از راه‌های سخت کردن سطح فولاد، افزایش غلظت کربن با استفاده از فرایند نفوذ است. به این فرایند کربن‌دهی گویند.
- نمونه کاربردی آن سخت کردن سطح چرخنده‌های فولادی است. برای این کار فولاد را در دمای بالا در معرض محیط آکنده از کربن مثل متان CH_4 و دوده قرار می‌دهند.

اصول

22 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



• برای مثال:

- یک چرخ دنده از جنس آلیاژ فولاد با غلظت اولیه کربن $0.25 \text{ wt}\%$ در دمای 950°C کربن دهی می‌شود.
- غلظت کربن محیط $1.20 \text{ wt}\%$ است.
- چه زمانی طول می‌کشد تا مقدار کربن در 0.5 mm زیر سطح فولاد به $0.8 \text{ wt}\%$ برسد.
- ثابت نفوذ کربن در آهن در این دما $1.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ است.

$$C_i = 0.25 \text{ wt}\%, C_s = 1.20 \text{ wt}\%, C_x = 0.80 \text{ wt}\%, x = 5 \times 10^{-4} \text{ m}, D = 1.6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\frac{C_x - C_i}{C_s - C_i} = \frac{0.8 - 0.25}{1.2 - 0.25} = 1 - \text{erf} \left(\frac{5 \times 10^{-4}}{\sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-11} \times t}} \right) \Rightarrow t = 7.1 \text{ h}$$

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان

23 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



عوامل مؤثر بر نفوذ


۱- نوع نفوذ:

- ثابت نفوذ D بیانگر سرعت نفوذ است. نوع نفوذ و همچنین نوع اتم‌های میزبان در ضریب نفوذ مؤثرند.
- ضریب نفوذ در خود و نفوذ دردیگری برای کربن در آهن در دمای 500°C بسیار متفاوت‌اند.

اصول علم مواد - دکتر فراهناکیان


24 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1

جدول ۲-۷ ضریب نفوذ در مواد مختلف



مقدار محاسبه شده	انرژی فعال سازی Q_d		فلز زمینه	نوع عناصر		
	$D(m^2/s)$	$T(^{\circ}C)$			ev/atom	kJ/mol
3.0×10^{-21}	۵۰۰	۲,۶۰	۲۵۱	2.8×10^{-4}	$\alpha-Fe$	Fe (BCC)
1.8×10^{-15}	۹۰۰					
1.1×10^{-17}	۹۰۰	۲,۹۴	۲۸۴	5.0×10^{-5}	$\gamma-Fe$	Fe (FCC)
7.8×10^{-16}	۱۱۰۰					
2.4×10^{-12}	۵۰۰	۰,۸۳	۸۰	6.2×10^{-7}	$\alpha-Fe$	C
	۹۰۰					
1.7×10^{-10}						C
5.9×10^{-12}	۹۰۰	۱,۵۳	۱۴۸	2.3×10^{-5}	$\gamma-Fe$	
	۱۱۰۰					
5.3×10^{-11}	۱۱۰۰					
4.2×10^{-19}	۵۰۰	۲,۱۹	۲۱۱	7.8×10^{-5}	Cu	Cu

25 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



۲-دما: دما تأثیر بسیار زیادی بر ضریب و نرخ نفوذ دارد. به عنوان مثال با افزایش دما از ۵۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی گراد ضریب نفوذ در خود برای آهن نوع α مرتبه افزایش می یابد. رابطه زیر وابستگی ضریب نفوذ به دما را نشان می دهد.

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_d}{RT}} \quad (7)$$

- D_0 ضریب مستقل از دما، Q_d انرژی فعال سازی نفوذ، R ثابت گازها و T دمای مطلق است. انرژی فعال سازی انرژی لازم برای حرکت نفوذی یک مول اتم است.
- هرچه انرژی فعال سازی بیشتر باشد، ضریب نفوذ و سرعت نفوذ کاهش می یابد. با لگاریتم گرفتن از رابطه بالا، رابطه زیر بدست می آید:

$$\log D = \log D_0 - \frac{Q_d}{2.3R} \left(\frac{1}{T} \right)$$

26 Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



۳- ساختار بلوری:

- وجود فضای خالی در ساختار بلوری از شرایط اصلی برای پدیده نفوذ است.
- از عوامل مؤثر در میزان فضای خالی موجود، ساختار بلوری ماده است.
- ضریب نفوذ برای آهن در ساختار بلوری FCC کمتر از BCC است.

27

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



کاربردهای نفوذ

سختی سازی سطح فولادها:

- در این روش سعی بر آن است که اتم‌های خارجی با ویژگی‌های موردنیاز سطح را به لایه خارجی سطح نفوذ دهند تا سختی لایه خارجی را افزایش بدهند.
- برای مثال به منظور افزایش **مقاومت سطحی آهن** می‌توان از اتم‌های کربن یا نیتروژن یا به‌طور همزمان از هر دو استفاده کرد.
- مثلاً افزایش سختی سطح چرخ‌دنده‌ها به منظور افزایش عمر خستگی آن‌ها و مقاومت به سایش آنها توسط عملیات حرارتی صورت می‌گیرد

28

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



خالص سازی گاز هیدروژن:

- در این فرآیند در یک طرف ورق نازکی از پالادیم، گاز هیدروژن ناخالص با فشار ثابت بالا (غلظت بالا) قرار داشته و در طرف دیگر آن هیدروژن با فشار ثابت پایین قرار دارد.
- پس هیدروژن به صورت پایا از یک طرف با فشار بالا به طرف دیگر با فشار پایین نفوذ می کند.

29

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



جوشکاری نفوذی:

- این روش یکی از فرآیندهای جوشکاری حالت جامد است که توسط اعمال فشار در دمای بالا بدون تغییر شکل پلاستیک میکروسکوپی انجام می شود. نفوذ فلزات در یکدیگر باعث ایجاد اتصال در این روش می شود.
- گاهی اوقات مقداری فلز پرکننده نیز بین سطوح جوشکاری اضافه می شود.

30

Material Science- Dr. Farahnakian- 99.1



تف جوشی:

- یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی مواد فلزی و سرامیکی تفت جوشی است که در آن ماده اولیه پودری، را پرس کرده و در کوره می‌گذارند.
- در دمای بالای کوره، نفوذ اتمی تشدید شده و اتم‌های ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می‌چسبانند.
- در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر به دست می‌آید.