$$K_{۲۰۰} = ۰/۸۱۳ + ۰/۰۰۰۵۸۲ \times ۲۰۰ \Rightarrow K_{۲۰۰} = ۰/۹۲۹۴ \frac{w}{m^{\circ}C}$$

$$K_{۱۰۰۰} = ۰/۸۱۳ + ۰/۰۰۰۵۸۲ \times ۲۰۰ \Rightarrow K_{۱۰۰۰} = ۱/۳۹۵ \frac{w}{m^{\circ}C}$$

و سپس مقدار متوسط بین این دو عدد را محاسبه می‌کنیم.

$$\overline{K} = ?$$

$$\overline{K} = \frac{K_{۲۰۰} + K_{۱۰۰۰}}{۲} \Rightarrow \overline{K}\frac{۰/۹۲۹۴ + ۱/۳۹۵}{۲} \Rightarrow ۱/۱۶۲۲ \frac{w}{m^{\circ}C}$$

توضیح اینکه از آنجایی که جنس آجر برای دماهای مختلف یکسان می‌باشد، بنابراین در دماهای مختلف که فازهای متفاوتی در آجر فعال می‌شوند ضریب هدایت حرارتی هم تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان میانگین دو ضریب را به‌عنوان ضریب هدایت حرارتی متوسط در نظر گرفت. اما اگر جنس آجرها با هم متفاوت بودند در دماهای مختلف باید از رابطه ضریب هدایت حرارتی متوسط آجرهای چند لایه مقدار آنرا محاسبه می‌کردیم.

مسئله چهارم کتاب: متن مسئله چهارم آخر فصل از روی کتاب خوانده می‌شود و برای هنرجویان تشریح می‌گردد که دو طرف یک دیسک به ترتیب $۳۰^{\circ}C$ و $۱۸۰^{\circ}C$ است و میزان حرارت عبور کرده از آن مشخص است. به این وسیله می‌توان ضریب هدایت حرارتی جسم را به‌دست آورد. فرضیات مسئله نوشته می‌شود.

قطر دیسک که به متر تبدیل می‌شود $D = ۱۲۰^{mm} = ۰/۱۲^{m}$ ضخامت دیسک

$d = ۲۰\ mm = ۰/۰۲\ m$

$\theta_۱ = ۳۰^{\circ}C \qquad A = \frac{\pi D^۲}{۴} \Rightarrow A = \frac{۳/۱۴ \times (۰/۱۲)^۲}{۴} \Rightarrow A = ۰/۰۱۱۳۰۴$

$\theta_۲ = ۱۸۰^{\circ}C \qquad Q = \frac{KAt\Delta\theta}{d} \Rightarrow \frac{Q}{t} = \frac{KA\Delta\theta}{d} \Rightarrow ۵۰/۶ = K\frac{۰/۰۱۱۳۰۴ \times (۱۸۰ - ۳۰)}{۰/۰۲}$

$\frac{Q}{t} = ۵۰/۶W \qquad K = \frac{۵۰/۶ \times ۰/۰۲}{۰/۰۱۱۳۰۴ \times (۱۸۰ - ۳۰)} \Rightarrow K = ۰/۵۹۶۸\frac{w}{m.C} \approx ۰/۶\frac{w}{m.C}$

$\overline{K} = ? \frac{w}{m^{\circ}C}$

مسئله پنجم: متن مسئله پنجم از روی کتاب خوانده می‌شود و فرضیات مسئله روی تخته نوشته می‌شود.

$\theta_۱ = ۱۱۰^{\circ}C$

$\theta_۲ = ۳۸^{\circ}C$

$d = ۱۲mm = ۰/۰۱۲mm$ چون واحد شیب را به متر می‌خواهد واحد را تبدیل می کنیم

اولاً $\frac{\Delta\theta}{d} = ?\frac{^{\circ}C}{m}$

از معادله شیب حرارتی داریم

$$\frac{\Delta\theta}{d}=\frac{\theta_۲-\theta_۱}{d}=\frac{۱۱۰-۳۸}{۰/۰۱۲}=۶۰۰۰\frac{^\circ C}{m}$$

قسمت دوم سؤال می‌گوید با فرض ثابت بودن شیب حرارتی یعنی $\frac{\Delta\theta}{d}=۶۰۰۰\frac{^\circ C}{m}$ می‌باشد.

حال میزان ضخامت پوسته آزبست را باید آنقدر زیاد کنیم تا به‌تدریج دما کمتر شود. طبق صورت مسئله دما در قسمت خارجی $۲۵^\circ C$ شود یعنی $\theta_۱=۲۵^\circ C$

در اینجا ضخامت جدید مورد سؤال است $d=?mm$

از معادله شیب حرارتی داریم

$$\frac{\Delta\theta}{d}=\frac{\theta_۲-\theta_۱}{d}$$

در قسمت اول $\frac{\Delta\theta}{d}$ را محاسبه کردیم و مقدار $۶۰۰۰\frac{^\circ C}{m}$ شد پس در اینجا خواهیم داشت

$$۶۰۰۰=\frac{۱۱۰-۲۵}{d}$$

$$d=\frac{۸۵}{۶۰۰۰}=۰/۰۱۴m$$

چون واحد را برحسب mm می‌خواهد متر را به mm تبدیل می‌کنیم

$$d=۰/۰۱۴m=۱۴mm$$

ـ چنانچه مشاهده شد برای اینکه دیواره خارجی کوره $۲۵^\circ C$ شود باید ضخامت آزبست را از ۱۲ میلی‌متر افزایش دهیم فرصت برای انتقال مفهوم به هنرجویان داده می‌شود و تخته برای شروع درس جدید پاک می‌گردد.

قسمت سوم درس: شدت جریان حرارتی

چنانچه گرمای انتقال یافته فقط در واحد زمان در نظر گرفته شود به آن شدت جریان حرارتی می‌گویند. یعنی نسبت θ به t یا $\frac{Q}{t}$ شدت جریان حرارتی از رابطه فوریه یا طرفین، وسطین کردن بدست می‌آید و علامت آن هم q است.

$$Q=K\frac{At\Delta\theta}{d}\Rightarrow\frac{Q}{t}=\frac{KA\Delta\theta}{d}\Rightarrow\frac{Q}{t}=q\Rightarrow q=\frac{KA\Delta\theta}{d}\Rightarrow q=\frac{KA(\theta_۲-\theta_۱)}{d}$$

قسمت چهارم درس: شدت جریان حرارتی مخصوص

چنانچه گرمای انتقال یافته در واحد زمان از هر واحد سطح مقطع جسم عبور کند به آن شدت جریان حرارتی مخصوص می‌گویند.

شدت جریان حرارتی مخصوص مانند شدت جریان حرارتی با طرفین، وسطین کردن رابطه فوریه بدست

می‌آید و آنرا با علامت q_e نشان می‌دهند.

$$Q = K\frac{At\Delta\theta}{d} \Rightarrow \frac{Q}{At} = \frac{K\Delta\theta}{d} \Rightarrow \frac{Q}{At} = q_e \Rightarrow q_e = \frac{K\Delta\theta}{d} \Rightarrow q_e = \frac{K(\theta_۲ - \theta_۱)}{d}$$

واحدهای شدت جریان حرارتی و شدت جریان حرارتی مخصوص: همانگونه که در مثال قبل در مورد K گفته شد با قراردادن هریک از پارامترهای رابطه می‌توان واحد K را به‌دست آورد.

$$q = \frac{Q}{t} \Rightarrow q = \frac{cal}{s} \text{ یا } \Rightarrow q = \frac{kcal}{hr} \text{ یا } \Rightarrow \frac{j}{s} = W$$

$$q_e = \frac{Q}{At} \Rightarrow q_e = \frac{cal}{cm^۲.s} \text{ یا } \Rightarrow q_e = \frac{kcal}{m^۲hr} \text{ یا } \Rightarrow q_e = \frac{j}{m.s} \equiv q_e = \frac{W}{m}$$

قسمت پنجم درس: هدایت حرارتی دیواره

تعریف: هدایت حرارتی قابلیت عبور حرارت از واحد سطح یک جسم می‌باشد.

هدایت حرارتی یک دیواره، بستگی به جنس آن K و عکس مقدار ضخامت آن $\frac{۱}{d}$ دارد. بنابراین بدیهی است که هر چقدر ضخامت جسم کمتر باشد هدایت آن بیشتر خواهد بود. از نظر ریاضی رابطه K با هدایت حرارتی رابطه مستقیم دارد، یعنی هرچه ضریب هدایت حرارتی بیشتر باشد، هدایت جسم بیشتر خواهد بود، در این رابطه مشخص می‌شود d نسبت معکوس با هدایت حرارتی دارد، یعنی هرچقدر ضخامت بیشتر شود هدایت حرارتی کمتر می‌شود. هدایت حرارتی را با σ نشان می‌دهند و رابطه آن برابر است با:

$$\frac{K}{d} = \sigma$$

واحد هدایت حرارتی متناسب با واحدهای k و d می‌باشد.

قسمت ششم درس: مقاومت حرارتی

مقاومت حرارتی یک جسم برعکس هدایت حرارتی آن است. یعنی مقاومتی که جسم در مقابل عبور حرارت از خود نشان می‌دهد.

$$R = \frac{۱}{\sigma} \Rightarrow R = \frac{۱}{\frac{K}{d}} \Rightarrow R = \frac{d}{K}$$

واحد مقاومت حرارتی نیز برعکس واحد هدایت حرارتی است. مقاومت حرارتی برعکس ضریب هدایت حرارتی است و هنرجویان این دو را با هم اشتباه نگیرند.

برای انتقال مفاهیم به‌صورت ریاضی به هنرجویان مثال زیر در کلاس مطرح می گردد و ضمن بیان صورت

مسئله (مثال) فرضیات مسئله روی تخته نوشته می‌شود.

ـ **مثال:** جداره مسطح یک کوره از آجر نسوز و به طول $35cm$ و ارتفاع $50cm$ در سطوح داخلی و خارجی به ترتیب به اندازه $1240°C$ و $40°C$ گرم شده است. اگر ضخامت این جداره $24cm$ و ضریب هدایت حرارتی آن به‌طور متوسط $\overline{K} = 0/92\frac{W}{m.C}$ باشد مطلوبست.

$$\text{طول} = 35cm = 0/35m$$

$$\text{ارتفاع یا عرض} = 50cm = 0/50m$$

$$\theta_2 = 1240°C$$

$$\theta_1 = 40°C$$

$$d = 24cm = 0/24m$$

$$\overline{K} = 0/92\frac{W}{m°C}$$

ـ اولاً شیب حرارتی را برحسب $\frac{°C}{cm}$ و $\frac{°C}{m}$ به‌دست آورید.

$$\frac{\Delta\theta}{d} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} = \frac{1240 - 40}{24} = 50\ \frac{°C}{m}$$

ـ برای واحد $\frac{°C}{m}$ مقدار d را برحسب m تبدیل می‌کنیم و می‌نویسیم.

$$\frac{\Delta\theta}{d} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} = \frac{1240 - 40}{0/24} = 5000\ \frac{°C}{m}$$

توضیح داده می‌شود که معنی این واحدها چیست

ـ در خصوص $\frac{°C}{m}$ 50 یعنی هریک سانتی‌متر که وارد دیواره می‌شویم $50°C$ دمای آن کاهش می‌یابد تا در خارج دیواره به $40°C$ می‌رسیم.

ـ **قسمت دوم سؤال:** شدت جریان حرارتی جداره برحسب W چقدر است. روی تخته نوشته می‌شود.

$$q = \frac{Q}{t} ?W$$

ابتدا مقدار A براساس اطلاعات داده شده محاسبه می‌شود.

$$A = 0/25 \times 0/5 = 0/175m^2$$

ـ از معادله شدت جریان حرارتی به‌دست می‌آید.

$$\frac{Q}{t} = \frac{A.\overline{K}(\theta_2 - \theta_1)}{d} = \frac{0/175 \times 0/92 \times (1240 - 40)}{0/24}$$

$$\frac{Q}{t} = 805W$$ شدت جریان حرارتی

ـ ثانیاً شدت جریان حرارتی مخصوص جداره را برحسب $\frac{W}{m^2}$ محاسبه کنید.

$$q_e = \frac{q}{A} = \frac{Q}{t}$$

$$q_e = \frac{805}{0/175} = 4600 \frac{W}{m^2}$$ شدت جریان حرارتی مخصوص

ـ رابعاً هدایت حرارتی جداره را بر حسب $\frac{W}{m^2\,^\circ C}$ محاسبه کنید

$$\sigma = \frac{k}{d} = \frac{0/92}{0/24} = 3/833 \frac{W}{m^2\,^\circ C}$$ هدایت حرارتی

ـ خامساً مقاومت حرارتی جداره برحسب $\frac{m^2\,^\circ C}{w}$

$$R = ?$$

می‌دانیم $$R = \frac{1}{\sigma} = \frac{d}{k}$$

$$R = \frac{0/24}{0/92} = 0/26 \frac{m^2\,^\circ C}{w}$$ مقاومت حرارتی

ـ هرچقدر مقاومت حرارتی جداره بیشتر باشد مقدار حرارت کمتری از کوره خارج می‌شود.

قسمت هفتم درس: انتقال حرارت برای دیواره مسطح چند لایه

تا به حال درخصوص جداره‌هایی صحبت شد که فقط از یک جنس هستند. اما در کوره‌ها دیواره‌ها از جنس‌های مختلف تشکیل شده‌اند.

حداقل ۲ لایه دارند یکی نسوز و دیگری دیواره فولادی این دو از نظر انتقال حرارت و ضریب هدایتی حرارت با یکدیگر متفاوت هستند. در این حالت چگونه می‌توان از معادلات انتقال حرارت استفاده کرد؟

هنرجویان به انحاء مختلف اظهار نظر می‌کنند. زودترین جواب، این است که متوسط را می‌گیریم بلافاصله باید مطرح شود که اگر ضخامت‌های جنس‌های مختلف فرق کنند متوسط نمی‌تواند پاسخ‌گو باشد. برای تفهیم موضوع گفته شود.

ـ در دو حالت مختلف در نظر بگیرید یک حالت وقتی که نسوز ۲۰cm و جداره فولادی ۲cm و در حالت دیگر نسوز ۲cm و جداره فولادی ۲۰cm باشد آیا در دو حالت میزان انتقال حرارت یکسان است؟ با وجود اینکه متوسط ضریب هدایت حرارتی در دو حالت یکسان می‌شود.

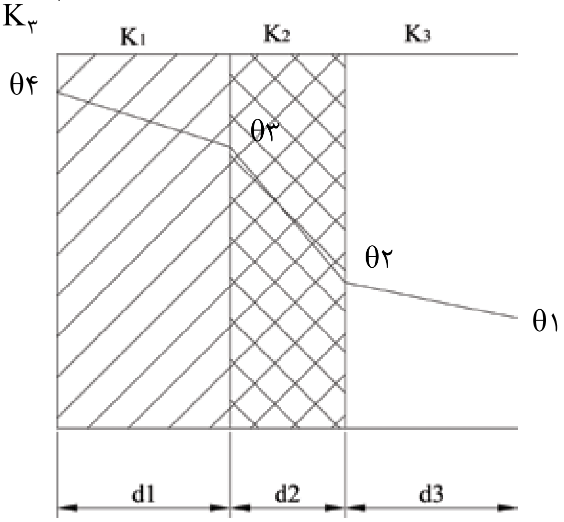
فرصت داده شود که هنرجویان فکر کنند و با هدایت هنرآموز بفهمند که میزان انتقال حرارت در حالتی که جداره فولادی ۲۰cm است خیلی بیشتر از حالتی است که جداره نسوز ۲۰ سانتی‌متر است و یا برعکس وقتی نسوز ۲۰ سانتی‌متر است کوره عایق‌تر است و گرما کمتر به خارج کوره منتقل می‌شود.

ـ در این حالت ضریب هدایت حرارتی متوسط کارآمد نیست، باید ضریب هدایت حرارتی معادل را تعیین کرد. درصورتی که دیواره‌ای از چند لایه با ضریب هدایت حرارتی $K_۱, K_۲, K_۳$ تشکیل شده باشد نحوه محاسبه انتقال حرارت به کمک رابطه فوریه انجام می شود.

$$d = d_۱ + d_۲ + d_۳ + \cdots$$

که d مجموع ضخامت‌ها می‌باشد و K_{eq} ضریب هدایت حرارتی معادل می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Keq = \frac{d}{\frac{d_۱}{K_۱} + \frac{d_۲}{K_۲} + \frac{d_۳}{K_۳} + \cdots}$$



شکل ۱-۳- انتقال حرارت از یک دیواره سه لایه

مثال: درجه حرارت سطح داخلی و خارجی جداره دو لایه یک کوره عملیات حرارتی به ابعاد $۴۰ \times ۶۰cm$ به ترتیب عبارتند از $θ_۲=۱۰۰۰^\circ C$ و $θ_۱=۱۰۰^\circ C$ اگر لایه اول از جنس آجر نسوز به ضخامت $۱۰cm$ و لایه دوم از جنس خاک رس به همراه کلوخه‌های آجر نسوز به ضخامت $۱۳cm$ باشد و ضریب هدایت حرارتی آجر نسوز $۰/۰۰۲\frac{cal}{cm.c.s}$ و ضریب هدایت حرارتی خاک رس به همراه کلوخه آجر نسوز برابر $۰/۰۰۱۵\frac{cal}{cm.c.s}$ باشد مقدار حرارت انتقال یافته در مدت $۶۰s$ چند cal است؟

ابتدا باید Keq را محاسبه نمود سپس این مقدار را در رابطه فوریه قرار داده مقدار حرارت انتقال یافته بدست می‌آید.

$$Keq = \frac{d(d_۱ + d_۲)}{\frac{d_۱}{K_۱} + \frac{d_۲}{K_۲}} \Rightarrow Keq = \frac{۱۰+۱۳}{\frac{۱۰}{۰/۰۰۲} + \frac{۱۳}{۰/۰۰۱۵}}$$

$$\Rightarrow Keq = ۰/۰۰۱۶۸\frac{cal}{cm.c.s}$$

$$A = a \times b \Rightarrow A = ۶۰ \times ۴۰ \Rightarrow A = ۲۴۰۰cm^۲$$

$$Q = Keq\frac{A(\theta_۲ - \theta_۱)t}{d(d_۱ + d_۲)} \Rightarrow Q = ۰/۰۰۱۶۸\frac{۲۴۰۰(۱۰۰۰ - ۱۰۰)۶۰}{۲۳}$$

$$\Rightarrow Q = ۹۴۶۶/۴۳۴cal$$

قسمت هشتم درس

ـ امروز با مفاهیم شدت جریان حرارتی، شدت جریان حرارتی مخصوص، هدایت حرارتی دیواره و مقاومت حرارتی آشنا شدید.

ـ همچنین با ضریب هدایت حرارتی معادل آشنا شدید که بجای ضریب هدایت حرارتی در معادله فوریه برای دیواره‌های چند لایه استفاده می‌شود.

$$Keq = \frac{d}{\frac{d_۱}{K_۱} + \frac{d_۲}{K_۲} + \frac{d_۳}{K_۳}}$$

$$d = d_۱ + d_۲ + d_۳ + \cdots$$

برای جلسه آینده مسئله‌های ۶ و ۷ و ۸ را برای تکلیف تعیین کرده و یادآوری این نکته که ابتدا آزمون کلاسی برگزار می‌شود.

برای جلسه آینده امتحان دوره‌ای از این فصل تا ابتدای انتقال حرارت استوانه‌ای تک‌لایه گرفته می‌شود و تعاریف مهم این فصل برای هنرجویان مشخص می‌شود.

هفته‌چهارم: رابطه انتقال حرارت در دیواره‌های استوانه‌ای تک‌لایه و رابطه انتقال حرارت در دیواره‌های استوانه‌ای چندلایه و رابطه انتقال حرارت به طریق جابجایی

این جلسه مربوط به تدریس صفحات ۱۳ تا ۱۵ کتاب است و به قسمت‌های زیر تقسیم می‌گردد.

۱ـ آزمون کلاس و پاسخ آزمون

۲ـ حل مسائل فصل

۳ـ تدریس انتقال حرارت در دیواره‌های استوانه‌ای تک‌لایه

۴ـ رابطه ضریب هدایت حرارتی برای دیواره‌های استوانه‌ای چند لایه

۵ـ رابطه انتقال حرارت به طریق جابجایی

۶ـ خلاصه درس و تکلیف برای جلسه آینده

قسمت اول درس

با توزیع ورقه‌های آزمون کلاسی شروع و حضور و غیاب در حین پاسخ‌گویی به آزمون انجام می‌گیرد متن آزمون به شرح زیر است.

نام و نام خانوادگی:

۱ـ مشخصات و ابعاد یک جداره مسطح دولایه عبارت است از: لایه گرم و لایه سرد

لایه گرم $d_1 = ۱۶cm, K_1 = ۱/۶ \times ۱۰^{-۳} \frac{cal}{cm.c.s}$

لایه سرد $d_2 = ۸cm, K_2 = ۲ \times ۱۰^{-۴} \frac{cal}{cm.c.s}$

$\theta_1 = ۳۵^\circ C$ و $\theta_3 = ۱۰۲۰^\circ C$ سطح انتقال گرما $A = ۲۰۰۰cm^2$، چنانچه ضریب هدایت حرارتی هر لایه ثابت باشد مطلوبست محاسبه و تعیین:

الف) ضریب هدایت حرارتی معادل جداره

ب) مقدار حرارت انتقال یافته از جداره در مدت ۷ دقیقه برحسب کیلوکالری

پس از فرصت ۱۰ دقیقه‌ای برای پاسخ‌گویی به آزمون برگه‌ها برای تصحیح و نمره‌دادن جمع می‌گردد.
تکالیف نیز به همین منوال و جواب مسئله در فرصت ۱۰ دقیقه برای هنرجویان توضیح داده شده و حل می‌گردد.
ابتدا فرضیات مسئله روی تخته نوشته می‌شود.

$d_1 = ۱۶cm$

$K_1 = ۱/۶ \times ۱۰^{-۳} \frac{cal}{cm.c.s}$

$d_۲ = ۸cm$

$K_۲ = ۲\times۱۰^{-۴}\dfrac{cal}{cm.c.s}$

$\theta_۱ = ۳۵^\circ C$

$\theta_۲ = ۱۰۲۰^\circ C$

$A = ۲۰۰۰۰cm^۲$

$Keq = ?$

ـ از معادله محاسبه ضریب هدایت حرارتی معادل استفاده می‌شود. بنابراین:

$$Keq = \frac{d}{\frac{d_۱}{K_۱}+\frac{d_۲}{K^۲}}$$

چون $K_۳$ نداریم از نوشتن آن اجتناب شد. فکر می‌کنید اگر جداره‌ای ۴ لایه باشد چکار باید کرد؟

برای منتظر پاسخ هنرجویان چند لحظه‌ای توقف می‌کنیم و از لابلای صحبت‌های آنها استخراج می‌کنیم که:

ـ بله باید $\frac{d_۴}{k_۴}$ را به مخرج اضافه کرد دقت کنید که نسبت d به k همان مقاومت حرارتی می‌باشد. سپس در معادله پارامترها را جایگذاری کرده و Keq را محاسبه می‌کنیم.

$d = d_۱ + d_۲$

$d = ۱۶ + ۸ = ۲۴$

$$Keq = \frac{۲۴}{\frac{۱۶}{۱/۶\times۱۰^{-۳}}+\frac{۸}{۲\times۱۰^{-۳}}}$$

$$Keq \quad \frac{۲۴}{\frac{۱۶}{۱۰\times۱۰^{۳}} \quad \frac{۸}{۴\times۱۰^{۴}}}$$

$$Keq = \frac{۲۴}{۵۰۰۰} = ۴/۸\times۱۰^{-۳}\frac{cal}{cm^\circ Cs}$$

برای قسمت ب از معادله فوریه استفاده شده و پارامترهای مربوط به مسئله در آن قرار می‌گیرد.

$$Q = Keq\frac{A(\theta_۲-\theta_۱)t}{d(d_۱+d_۲)}$$

$t = ۷\min\times۶۰ = ۴۲۰s$ زمان به ثانیه تبدیل می شود

$$Q = ۴/۸\times۱۰^{-۳}\frac{۲۰۰۰\times(۱۰۲۰-۳۵)\times۴۲۰}{۲۴}$$

$Q = ۱۶۵۴۸۰cal$

و از آنجا که هر ۱۰۰۰ کالری یک کیلوکالری است پس $Q = ۱۶۵/۵Kcal$

قسمت دوم درس

حل مسائل آخر فصل مسئله ۶ کتاب، ابتدا صورت مسئله خوانده می‌شود و فرضیات مسئله به‌ترتیب روی

تخته نوشته می‌شود.

$A=0/25m^2$ در قسمت الف

$\theta_2=1100^\circ C$

دقت شود که با این واحد ضریب انتقال هدایت حرارتی حدود ۰/۶ می‌باشد

$\overline{K}=0/6\dfrac{w}{m^2\,{}^\circ C}$ به هنرجویان عدد بدست آمده در آزمون را یادآوری کنید.

$d=?$

$\theta_1=40^\circ C$

$d=10cm$

$Q=20kcal=20000cal=84000j$

$t=1min=60s$

از قانون اول فوریه استفاده می‌شود. دقت کنید واحدهای تمام پارامترها بایستی مطابق یکدیگر باشد. مثلاً Kcal باید با ضرب‌کردن آن در ۱۰۰۰ به cal تبدیل شود و با ضرب آن در ۴/۲ به ژول تبدیل شود. و دقیقه با ضرب‌کردن آن در ۶۰ به ثانیه تبدیل شود.

$$Q=K\frac{A_\circ(\theta_2-\theta_1)_\circ t}{d}$$

$$84000=0/6\times\frac{0/25\times(1100-40)\times60}{d}$$

$$84000=\frac{9540}{d}$$

ـ با طرفین و وسطین کردن به‌دست می‌آید.

$$d=\frac{9540}{84000}=0/113571\ \ m\simeq0/114$$

ـ برای تبدیل متر به سانتی متر کافی است آن را در ۱۰۰ ضرب کنیم.

$$d=0/114\times100=11/4\,cm$$

قسمت دوم مربوط به تبدیل واحد ضریب هدایت حرارتی یعنی $\overline{K}$ به واحدهای دیگری باشد که به نحو زیر عمل می‌شود.

هنرآموز روی تبدیل واحدها توضیحات لازم را بایستی به نحوی که هنرجویان متوجه شوند ارائه دهد. برای این منظور هرآنچه را که روی تخته می‌نویسد با کمک‌گرفتن از هنرجویان و سؤال‌کردن که (مثلاً) هر متر چند سانتی‌متر است و ایجاد تناسب روی تخته انجام می‌دهد.

$1\dfrac{cal}{cm.c.s}$ $\qquad$ $420.\dfrac{w}{m.c}$

x $\qquad$ $0/6$

$$X=\frac{0/6}{420}=0/00142\frac{cal}{cm.c.s}$$

$۱\dfrac{kcal}{m.c.hr}$ $۱/۱۶۳\dfrac{w}{m.c}$

x $۰/۶$

$$X=\frac{۰/۶}{۱/۱۶۳}=۰/۵۱۵۹\frac{kcal}{m.c.hr}$$

مسئله ۷: آخر فصل از روی کتاب خوانده می‌شود و سپس فرضیات مسئله روی تخته نوشته می‌شود.

$\theta_۲=۱۲۵۰^\circ C$

$\theta_۱=۴۰^\circ C$

$\theta_۸=?$

$d_۱=۸cm$

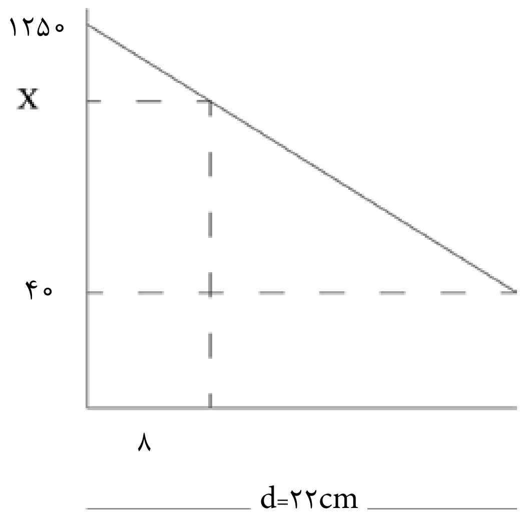
ـ ابتدا شیب حرارتی را در این شرایط به‌دست می‌آوریم

$$\frac{\Delta\theta}{d}=\frac{\theta_۲-\theta_۱}{d}=\frac{۱۲۵۰-۴۰}{۲۲}=۵۵\frac{^\circ C}{cm^\circ C}$$

ـ با توجه به ثابت‌بودن شیب خط در دیواره برای عمق ۸ سانتی‌متری سطح داخل خواهیم داشت.

$$\frac{\Delta\theta}{d}=\frac{\theta_۲-\theta_۸}{d_۱}\Rightarrow ۵۵=\frac{۱۲۵۰-\theta_۸}{۸}\Rightarrow ۵۵\times ۸=۱۲۵۰-\theta_۸=۱۲۵۰-۴۴۰\Rightarrow \theta_۸=۸۱۰^\circ C$$

برای تفهیم موضوع به هنرجویان بهتر است مطابق شکل زیر روی تخته شیب دما را در دیواره قالب رسم شود و نشان داده شود که در عمق ۸ سانتی‌متری دما بین $۱۲۵۰^\circ C$ و ۴۰ درجه می‌باشد و چنانچه مشاهده می‌شود به $۱۲۵۰^\circ C$ نزدیکتر است.



شکل ۱-۴

توضیح داده شود که $\dfrac{\Delta\theta}{d}$ شیب خط را به صورت ریاضی نشان می‌دهد.

سپس مسئله ۸ آخر فصل از روی کتاب خوانده شود و مطابق معمول فرضیات روی تخته نوشته می‌شود.

$\theta_{۲} = ۱۱۰۰^{\circ}C$

$\theta_{۱} = ۴۰۰^{\circ}C$

$K_{۱} = ۰/۴\frac{W}{m^{\circ}C}$ در دمای $۴۰۰^{\circ}C$

$K_{۲} = ۰/۶\frac{W}{m^{\circ}C}$ در دمای $۱۱۰۰^{\circ}C$

$d = ۲۰cm = ۰/۲m$ (واحد باید تبدیل شود)

ـ فکر می‌کنید برای تعیین هدایت حرارتی چه کار بکنیم؟

فرصت داده شود تا هنرجویان معادله هدایت حرارتی یعنی $\sigma = \frac{\bar{k}}{d}$ را بگویند.

ـ خوب در اینجا به جای K کدام عدد ۰/۴ یا ۰/۶ را باید بگذاریم؟

فرصتی برای فکرکردن به هنرجویان داده شود و احتمالاً از بین آنها کسی بگوید متوسط آنها را در نظر می‌گیریم که در این حالت باید یادآوری شود که $\bar{K}$ را می‌توانیم محاسبه کنیم و روی تخته نوشته شود.

$$\bar{K} = \frac{K_{۱} - K_{۲}}{۲} = \frac{۰/۴ - ۰/۶}{۲}$$

$$\bar{K} = ۰/۵\frac{w}{m^{\circ}C}$$

ـ حال می‌توان مقدار هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی را از معادلات محاسبه نمود.

$$\sigma = \frac{\bar{K}}{d} = \frac{۰/۵}{۰/۲} = ۲/۵\frac{W}{m^{\circ}C}$$

$$R = \frac{۱}{\sigma} = \frac{۱}{۲/۵} = ۰/۴\frac{m^{۲}\,{}^{\circ}C}{w}$$

ـ یا می‌توان مقاومت حرارتی را مستقیم از معادله حساب کرد یعنی:

$$R = \frac{d}{K} = \frac{۰/۲}{۰/۵} = ۰/۴\frac{m^{۲}\,{}^{\circ}C}{W}$$

ـ شدت جریان حرارتی مخصوص جداره (q_e) از معادله آن قابل حساب کردن است.

در اینجا مجدداً تعریف شدت جریان حرارتی مخصوص یعنی «مقدار حرارتی که در واحد زمان از واحد سطح دیواره عبور می‌کند» برای یادآوری هنرجویان ذکر می‌گردد. سپس نوشته می‌شود.

$$q_e = \frac{Q}{A.t} = \overline{K}\ \frac{\theta_۲ - \theta_۱}{d}$$

$$q_e = ۰/۵\ \frac{۱۱۰۰ - ۴۰۰}{۰/۲}$$

$$q_e = ۱۷۵۰\ \frac{w}{m^۲}$$

حل مسئله ۹ که صورت مسئله از روی کتاب خوانده شده و فرضیات مسئله به شرح زیر روی تخته نوشته می‌شود. در نوشتن فرضیات مسئله و حل مسائل بایستی تعامل بین هنرآموزان و هنرجویان به نحوی از دهان هنرجویان گرفته شود و به هر پاسخ صحیح یک قدردانی و تشویق لفظی صورت پذیرد. بهترین تشویق لفظی صداکردن اسم هنرجو و گفتن این جمله است که شما درست گفته‌اید.

$K_۱ = ۱/۶ \times ۱۰^{-۳}$ $\qquad$ $K_۲ = ۳/۷ \times ۱۰^{-۴}$

$Keq = ?\frac{w}{m^۲c}$ $\qquad$ $\theta_۱ = ۲۵c \qquad \theta_۳ = ۹۸۰c$

$t = ۸min = ۸ \times ۶۰ = ۴۸۰S$

$\frac{Q}{t} = ?W$ $\qquad$ $A = ۲۰۰۰cm^۲ \Rightarrow \frac{۲۰۰۰}{۱۰۰۰۰} = ۰/۲m^۲$

$q = ?\frac{W}{m^۲}$

$d_۲ = ۲cm \qquad d_۱ = ۱۶cm$ $\qquad$ $d = d_۱ + d_۲ \Rightarrow d = ۱۶ + ۲ = ۱۸cm$

ـ دقت داده شود که مسئله مشابه آزمون گرفته شده است هنرجویان تشویق شوند تا خود راه‌حل‌ها را بگویند و سپس روی تخته مسئله حل شود.

الف) $$Keq = \frac{d}{\frac{d_۱}{k_۱} + \frac{d_۲}{k_۲}} \Rightarrow Keq = \frac{۱۸}{\frac{۱۶}{۱/۶\times۱۰-۳} + \frac{۲}{۳۰۷\times۱۰-۴}} = ۱/۱۶۸ \times ۱۰^{-۳}\ \frac{cal}{cm.c.s}$$

ب) $$Q = Keq\frac{A(\theta_۳ - \theta_۱)t}{d} \Rightarrow Q = ۱/۱۶۸ \times ۱۰^{-۳} \times \frac{۲۰۰۰\times(۹۸۰ - ۲۵)۴۸۰}{۱۸}$$

$$Q = ۵۹۴۹۰/۱۳cal \approx ۵۹/۵Kcal$$

ج) $$\frac{Q}{t} = \frac{۵۹۴۹۰/۱۳ \times ۴/۱۸۶۸}{۴۸۰} = ۵۱۸/۹۰۲W$$

توضیح اینکه: در قسمت جیم مسئله مقدار Q برای اینکه برحسب وات بدست آید برحسب ژول باید محاسبه شود. زیرا ژول بر ثانیه همان وات است به این منظور در عدد ۴/۱۸ ضرب گردید.

حل مسئله ۱۰ مشابه روال انجام شود

$$A = 0/05 m^2 \Rightarrow 0/05 \times 10000 = 500 cm^2$$

$$\theta_2 = 1350^\circ C$$

$$d = ?$$

$$\theta_1 = 80^\circ C$$

$$Q = 11/85 kcal \Rightarrow 11/85 \times 1000 = 11850 \ cal$$

$$t = 1 min \Rightarrow 1 \times 60 = 60 s$$

$$K = 1/4 \times 10^{-3} \frac{cal}{cm.C.s}$$

$$Q = K \frac{A(\theta_2 - \theta_1)t}{d}$$

$$11850 = 1/4 \times 10 - 3 \times \frac{500 \times (1350 - 80) \times 60}{d} \Rightarrow d = 4/50 \ cm$$

توضیح اینکه: محفظه قالب مکعبی دارای شش سطح می‌باشد که این محاسبات فقط برای یک سطح در نظر گرفته شده است زیرا مساحت یک سطح در محاسبات منظور شده است. اما می‌توان نتیجه را به تمامی سطوح تعمیم داد.

در حین پاسخ‌گویی به اشکالات و سؤالات هنرجویان با کنترل زمان کلاس و تخصیص زمان مناسب برای درس جدید تخته پاک شده و درس جدید شروع می‌شود.

قسمت سوم درس: محاسبه انتقال حرارت برای جداره‌های استوانه‌ای تک‌لایه

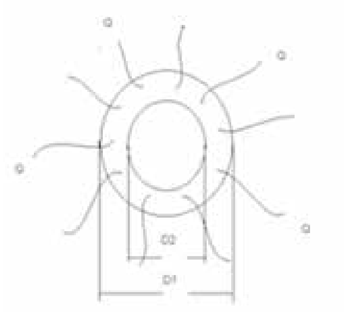
ـ تا به حال دیواره‌های مسطح مورد نظر بود اما در این قسمت می خواهیم دیوارهای استوانه‌ای را مد نظر قرار دهیم. در این حالت سطحی که گرما از آن عبور می‌کند ثابت نیست.

ـ به نظر شما در معادله فوریه به جای A باید سطح داخلی استوانه در نظر گرفته شود یا سطح خارجی آن؟ کدام سطح بزرگتر است؟

ـ بله بایستی سطح را مابین این دو سطح در نظر گرفته معادلات زیر بر این اساس نوشته شده‌اند.

ـ هرگاه جداره استوانه‌ای شکل نظیر کوره زمینی داشته باشیم که قطر داخی آن D_2 و قطر خارجی آن D_1 باشد و همچنین دمای داخلی آن θ_2 و دمای خارجی آن را θ_1 در نظر بگیریم در چنین جداره‌هایی عمدتاً انتقال حرارت در راستای شعاع از محل گرم به محل سرد صورت می‌گیرد.

L ارتفاع استوانه (کوره)



شکل ۲-۴

$$Q = \frac{K\pi Lt(\theta_۲ - \theta_۱)}{\frac{D_۱ - D_۲}{D_۱ + D_۲}}$$

دانستنی‌های معلم

اثبات رابطه انتقال حرارت برای جداره استوانه‌ای تک‌لایه

هرگاه جداره استوانه‌ای نظیر (کوره) داشته باشیم که شعاع داخلی آن $r_۲$ و شعاع خارجی آن $r_۱$ باشد و همچنین دمای داخلی آن $T_۲$ و دمای خارجی آن را $T_۱$ در نظر بگیریم در چنین جداره‌هایی عمدتاً انتقال حرارت در راستای شعاع از محل گرم به محل سرد صورت می‌گیرد.

L : ارتفاع استوانه (کوره)

برای چنین دیواره‌ای قانون فوریه

$$Q = KAt\frac{dT}{dr} \qquad A = ۲\pi rL$$

$$Q = K۲\pi rlt\frac{dT}{dr} \Rightarrow \frac{dr}{r}Q = \int_{T_۱}^{T_۲} ۲\pi rltKdT \Rightarrow$$

$$Q\int_{r۱}^{r۲} dr\,|\,r = ۲\pi Klt\int_{T_۱}^{T_۲} dT \quad \Rightarrow \quad Q = Ln\frac{r۱}{r۲} = ۲\pi Klt(T_۲ - T_۱)$$

$$Q = \frac{۲K\pi lt(T_۲ - T_۱)}{\ln\frac{r۱}{r۲}} \quad \text{یا} \quad Q = \frac{۲K\pi lt(T_۲ - T_۱)}{\ln\frac{D_۱}{D_۲}}$$

از آنجایی که در نسبت‌های $\frac{D_۱}{D_۲}$ نزدیک ۱، $\ln\frac{D_۱}{D_۲}$ برابر $۲\frac{D_۱ - D_۲}{D_۱ + D_۲}$ می‌باشد با قراردادن مقدار مساوی آن

$$Q = \frac{۲K\pi lt(T_۲ - T_۱)}{۲\frac{D_۱ - D_۲}{D_۱ + D_۲}} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{K\pi lt(T_۲ - T_۱)}{\frac{D_۱ - D_۲}{D_۱ + D_۲}}$$

مسئله نمونه برای این قسمت عبارت است از:

ـ درجه حرارت سطح خارجی و داخلی جداره یک کوره استوانه‌ای به قطر داخلی ۳۰cm و قطر خارجی ۶۰cm و ارتفاع ۶۰cm از جنس نسوز به ترتیب ۵۰°C و ۱۱۵۰°C می‌باشد اگر ضریب هدایت حرارت نسوز $\overline{K}=۲\times۱۰^{-۳}\ \frac{cal}{cm.c.s}$ باشد مطلوبست محاسبه حرارت خارج شده از جداره کوره در مدت ۶۰ ثانیه.

ـ فرضیات مسئله عبارت است از:

$$d_۱=۶۰cm$$

$$d_۲=۳۰cm$$

$$L=۶۰cm$$

$$\theta_۱=۵۰^\circ C$$

$$\theta_۲=۱۱۵۰^\circ C$$

$$\overline{K}=۲\times۱۰^{-۳}\ \frac{cal}{cm.c.s}$$

$$t=۶۰$$

$$Q=?$$

ـ با گذاشتن اعداد در معادله حرارت در جداره‌های استوانه‌ای مقدار حرارت به‌دست می‌آید.

$$Q=\frac{K\pi Lt(\theta_۲-\theta_۱)}{\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}}$$

$$Q=\frac{۳/۱۴\times۲\times۱۰^{-۳}\times۶۰\times۶۰}{\frac{۶۰-۳۰}{۶۰+۳۰}}\times(۱۱۵۰-۵۰)$$

$$Q=\frac{۲۲/۶۰۸}{۰/۳۳۳}\times۱۱۰۰=۷۴۶۰۶/۴cal$$

مقدار حرارت خارج شده از دیواره استوانه‌ای در مدت ۶۰ ثانیه (یک دقیقه)

قسمت چهارم درس: رابطه ضریب هدایت حرارتی معادل برای دیواره استوانه‌ای چند لایه:

در دیواره‌های استوانه‌ای چندلایه نیز مانند دیواره‌های مسطح چندلایه برای محاسبه حرارت انتقال یافته باید ضریب هدایت حرارتی معادل را محاسبه کرد.

$$Keq=\frac{۱}{\frac{۱}{K۱}\times\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}+\frac{۱}{K_۲}\times\frac{D_۲-D_۳}{D_۲+D_۳}+\frac{۱}{K۳}\times\frac{D_۳-D_۴}{D_۳+D_۴}}$$

$$Q=K_{eq}\pi Lt(\theta_۴-\theta_۱)$$

دانستنی‌های معلم

اثبات رابطه انتقال حرارت جداره‌های استوانه‌ای چندلایه

و به همین ترتیب برای جداره‌های استوانه‌ای چندلایه می‌توان رابطه انتقال حرارت را بدین صورت نوشت.

$$Q=\frac{۲\pi lt(\theta_۴-\theta_۱)}{\frac{۱}{K۳}\ln\frac{D_۳}{D_۴}+\frac{۱}{K_۲}\ln\times\frac{D_۲}{D_۳}+\frac{۱}{K۱}\ln\frac{D_۱}{D_۲}}\Rightarrow\ \ln\frac{D_۱}{D_۲}=۲\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}$$

$$Q=\frac{۲\pi lt(\theta_۴-\theta_۱)}{\frac{۱}{K۳}\times\frac{D_۴-D_۳}{D_۴+D_۳}+\frac{۱}{K_۲}\times\frac{D_۳-D_۲}{D_۳+D_۲}+\frac{۱}{K۱}\times\frac{D_۲-D_۱}{D_۲+D_۱}}$$

تذکر اینکه اگر رابطه Keq استوانه‌ای چندلایه را در رابطه Q قرار دهیم رابطه بالا بدست خواهد آمد. برای جداره استوانه‌ای تک‌لایه هم می‌توان Keq را مجزا محاسبه کرد سپس در رابطه Q قرار داد که در هر دو صورت نتیجه یکی خواهد شد.

مثال: درجه حرارت سطح داخلی و خارجی جداره دولایه یک کوره استوانه‌ای شکل به ترتیب عبارتند از: $\theta_۳=۱۰۰۰^oC$ و $\theta_۱=۱۰۰۰^oC$ ابعاد این کوره برابرند با:

ارتفاع داخلی کوره $L=۱۲cm$ و قطر داخلی $D_۳=۱۰۰cm$ و قطر میانی $D_۲=۱۳۰cm$ و قطر خارجی $D_۱=۱۵۰cm$ لایه خارجی از خاک رس به ضریب هدایت حرارتی متوسط $K_۱=۰/۰۰۲\frac{cal}{cm.c.s}$ و لایه داخلی از آجر نسوز به ضریب هدایت حرارتی متوسط $K_۲=۰/۰۰۱۵\frac{cal}{cm.c.s}$ تشکیل شده است تعیین کنید:

الف) مقدار حرارت انتقال یافته از این جداره برحسب kcal در مدت یک ساعت

ب) درجه حرارت در فصل مشترک آجر نسوز و خاک رس

$$Keq=\frac{۱}{\frac{۱}{K۱}\times\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}+\frac{۱}{K_۲}\times\frac{D_۲-D_۳}{D_۲+D_۳}}\Rightarrow Keq=\frac{۱}{\frac{۱}{۰/۰۰۲}\times\frac{۱۵۰-۱۳۰}{۱۵۰+۱۳۰}+\frac{۱}{۰/۰۰۱۵}\times\frac{۱۳۰-۱۰۰}{۱۳۰+۱۰۰}}\Rightarrow$$

$$K_{eq} = ۰/۰۰۸۱۵ \frac{cal}{cm.c.s}$$

چون یک ساعت برابر با ۳۶۰۰ ثانیه است بنابراین کل حرارت انتقالی

$$Q = \pi K_{eq} Lt(\theta_۳ - \theta_۱)$$

$$Q = ۳/۱۴ \times ۸/۱۵ \times ۱۰^{-۳} \times ۱۲۰ \times ۳۶۰۰ \times (۱۰۰۰ - ۱۰۰) \Rightarrow Q = ۹/۹۶ \times ۱۰^{۶} cal$$

از آنجایی که مقدار حرارت عبوری از دیواره‌های با جنس‌های مختلف با هم برابر است بنابراین برای بدست‌آوردن دمای فصل مشترک به دو روش زیر می‌توان عمل نمود.

اول اینکه لایه بیرونی را حذف کرده و کوره را به‌صورت یک کوره استوانه‌ای تک لایه در نظر گرفت با مشخصات

$$D_۱ = ۱۳۰\ ,\ D_۲ = ۱۰۰\ ,\ L = ۱۲۰\ ,\ \theta_۲ = ۱۰۰۰C\ ,\ \theta_۱ = X\ ,\ K = ۰/۰۰۱۵$$

دوم اینکه لایه داخلی را حذف کرده و کوره را بصورت یک کوره استوانه‌ای تک‌لایه در نظر گرفت با مشخصات

$$D_۲ = ۱۵۰\ ,\ D_۳ = ۱۳۰\ ,\ L = ۱۲۰\ ,\ \theta_۲ = X\ ,\ \theta_۱ = ۱۰۰C\ ,\ K = ۰/۰۰۲$$

$$Q = K\frac{\pi Lt\Delta\theta}{\frac{D_۱ - D_۲}{D_۱ + D_۲}} \Rightarrow ۹/۹۶ \times ۱۰^{۶} = ۰/۰۰۲ \frac{۳/۱۴ \times ۱۲۰ \times ۳۶۰۰ \times \Delta\theta}{\frac{۱۵۰ - ۱۳۰}{۱۵۰ + ۱۳۰}}$$

$$\Delta\theta = ۲۶۲ \Rightarrow \Delta\theta = \theta_۲ - \theta_۱ \Rightarrow ۲۶۲ = \theta_x - ۱۰۰ \Rightarrow \theta_x = ۲۶۲ + ۱۰۰ \Rightarrow \theta_x = ۳۶۲C$$

قسمت پنجم درس: رابطه انتقال حرارت به طریق جابجایی

در این روش انتقال اتم‌ها یا مولکول‌های قسمت گرم و قسمت سرد جای خود را عوض می‌کنند این عمل تا موقعی که تمامی قسمت‌های جسم به یک درجه حرارت (تعادل) نرسد ادامه خواهد داشت. مثل بخاری روشن، شوفاژ، آب روی آتش و ...

مقدار این گرمای انتقالی در واحد زمان از رابطه زیر که به فرمول نیوتن مشهور است بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{t} = \alpha A(\theta_۲ - \theta_۱)$$

واحد α مشابه واحدهای عنوان شده برای $\frac{K}{d}$ در فصول قبلی می‌تواند باشد که با قراردادن هریک از پارامترهای رابطه می‌توان مقدار α را محاسبه نمود.

$$\alpha = \frac{Q}{tA\Delta\theta} \Rightarrow \alpha = \frac{J}{s.m^۲.c} \Rightarrow \alpha = \frac{w}{m^۲.c}$$

که بیشتر از این واحد در مسائل استفاده می‌شود. اما واحدهای دیگر عبارتند از:

$$\alpha = \frac{cal}{cm^{۲}.s.c} \Rightarrow \text{ یا } \alpha = \frac{kcal}{m^{۲}.hr.c}$$

مثال: برای خنک‌کردن یک ورق فولادی گرم به ابعاد $۵۵\times۸۰cm$ و دمای $۳۰۰^\circ C$ هوایی با دمای $۲۵^\circ C$ به مدت $۲۰s$ روی آن دمیده می شود. اگر در این انتقال ضریب کنوکسیون $۳۰\frac{w}{m^{۲}.c}$ باشد جریان حرارتی برحسب KW چه اندازه خواهد بود؟ همچنین مقدار حرارت کل انتقالی را برحسب Kj و Kcal حساب کنید.

$$A = a\times b \Rightarrow A = ۰/۵۵\times ۰/۸ \Rightarrow A = ۰/۴۴$$

$$\frac{Q}{t} = \alpha A(\theta_{۲}-\theta_{۱}) \Rightarrow \frac{Q}{t} = ۳۰\times ۰/۴۴\times(۳۰۰-۲۵) = ۳۶۳۰W = ۳/۶۳KW \quad \text{جریان}$$

$$Q = \frac{۷۲/۶}{۴/۱۸۶۸} \Rightarrow Q = ۱۷/۳۴Kcal$$

قسمت ششم درس:

ـ امروز سه مطلب زیر را آموختیم:

۱ـ امروز معادله انتقال حرارت برای جداره‌های استوانه‌ای را فرا گرفتیم.

۲ـ انتقال حرارت در دیواره‌های استوانه‌ای چندلایه که از معادلات زیر حاصل می‌گردد.

$$K_{eq} = \frac{۱}{\frac{۱}{K۱}\times\frac{D_{۱}-D_{۲}}{D_{۱}+D_{۲}} + \frac{۱}{K_{۲}}\times\frac{D_{۲}-D_{۳}}{D_{۲}+D_{۳}} + \frac{۱}{K_{۳}}\times\frac{D_{۳}-D_{۴}}{D_{۳}+D_{۴}}}$$

$$Q = K_{eq}\pi Lt(\theta_{۴}-\theta_{۱})$$

۳ـ انتقال حرارت به روش جابجایی براساس فرمول نیوتن بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{t} = \alpha A(\theta_{۲}-\theta_{۱})$$

برای جلسه آینده اشکالات و مسائل باقیمانده این فصل حل خواهد شد. چرا که قبل از شروع فصل دوم یک امتحان کلی از فصل اول گرفته می‌شود و این امتحانات و کار کلاسی هنرجویان نمره مستمر نوبت اول را تشکیل خواهد داد.

هفته پنجم: حل مسائل باقیمانده فصل اول، رفع اشکال و ابهامات و امتحان از فصل اول

در این جلسه سعی بر آماده‌کردن هنرجویان برای امتحان آخر فصل می‌باشد.

قبل از حل تمرین‌های این فصل لازم است تذکراتی در رابطه با حل مسائل عنوان گردد.

الف) همانگونه که قبلاً ذکر گردید بهتر است معلومات مسئله در یک سمت به همراه مجهولات نوشته شود.

ب) کلیه واحدهای موجود مسئله برحسب واحد K مرتب شوند چنانچه نیاز به تبدیل دارند انجام شود.

ج) انتقال حرارت جداره‌های مسطح بصورت خطی و یک‌بعدی می‌باشد، اما در انتقال حرارت جداره استوانه‌ای حرارت بصورت شعاعی خارج می‌شود.

همانگونه که در ابتدای سال تحصیلی و در طول تدریس به هنرجویان گفته شد، پس از پایان هر فصل از کتاب محاسبات فنی تخصصی امتحانی کلی از فصل گرفته می‌شود، و این امتحان با پرسش‌ها و کار کلاسی جمع شده و نمره مستمر را تشکیل می‌دهد.

در ابتدای جلسه پس از استقرار هنرجویان، در برگه‌های A۴ تهیه شده از قبل آزمون کلاسی گرفته می‌شود. سعی شود سؤالات تایپ شده و واضح بوده تا هیچگونه سؤالی از طرف هنرجویان نباشد.

نام و نام خانوادگی: .... زمان ۶۰ دقیقه (استفاده از ماشین‌حساب آزاد است)

۱ـ جداره مسطح یک کوره از آجر نسوز و دیرگداز به طول ۳۵cm و ارتفاع ۵۰cm در سطوح داخلی و خارجی به ترتیب به اندازه $۱۴۵۰^\circ C$ و $۴۰^\circ C$ گرم شده است. اگر ضخامت این جداره ۲۴cm و ضریب هدایت حرارتی آن بطور متوسط $K = ۰/۹۲\frac{w}{m.c}$ باشد مطلوبست

الف) شدت جریان حرارتی جداره $\frac{Q}{t}$ برحسب W و $\frac{kcal}{hr}$

ب) تعیین شیب حرارتی برحسب $\frac{c}{cm}$ و $\frac{c}{m}$

ج) شدت جریان حرارتی مخصوص جداره برحسب $\frac{w}{m^۲}, \frac{kcal}{m^۲.hr}$

د) هدایت حرارتی جداره برحسب $\frac{w}{m^۲.c}$ و مقاومت حرارتی آن برحسب $\frac{m^۲.c}{w}$

۲ـ درجه حرارت سطح داخلی و خارجی جداره دولایه یک کوره عملیات حرارتی به ابعاد ۴۰×۶۰cm به ترتیب عبارتند از $\theta_۲ = ۱۰۰۰C$ و $\theta_۱ = ۱۰۰C$ اگر لایه اول از جنس آجر نسوز به ضخامت ۱۰cm و لایه دوم از جنس خاک رس به همراه کلوخه های آجر نسوز به ضخامت ۱۳cm باشد و ضریب هدایت حرارتی آجر نسوز $۰/۰۰۲\frac{cal}{cm.c.s}$ و ضریب هدایت حرارتی خاک رس به همراه کلوخه آجر نسوز برابر $۰/۰۰۱۵\frac{cal}{cm.c.s}$ باشد مقدار حرارت انتقال‌یافته در مدت ۶۰s چند cal است؟

۳ـ درجه حرارت سطح داخلی و خارجی جداره دولایه یک کوره استوانه‌ای شکل به ترتیب

عبارتند از $\theta_2 = ۱۰۰۰C$ و $\theta_1 = ۱۰۰C$ ابعاد این کوره برابرند با:
ارتفاع داخلی کوره $L = ۱۲cm$ و قطر داخلی $D_3 = ۱۰۰cm$ و قطر میانی $D_2 = ۱۳۰cm$ و قطر خارجی $D_1 = ۱۵۰cm$ لایه خارجی از خاک رس به ضریب هدایت حرارتی متوسط $K_1 = ۰/۰۰۲\frac{cal}{cm.c.s}$ و لایه داخلی از آجر نسوز به ضریب هدایت حرارتی متوسط $K_2 = ۰/۰۰۱۵\frac{cal}{cm.c.s}$ تشکیل شده است تعیین کنید:

الف) مقدار حرارت انتقال یافته از این جداره برحسب kcal در مدت یک ساعت

ب) درجه حرارت در فصل مشترک آجر نسوز و خاک رس

در ضمن پاسخ‌گویی به آزمون توسط هنرجویان، فرصت برای حضور و غیاب وجود دارد.

پس از ۶۰ دقیقه برای آزمون کلاسی برگه‌ها برای تصحیح جمع می‌شود. پس از جمع‌آوری برگه‌ها با یک نظر کلی به پاسخ هنرجویان نقاط ضعف هنرجویان شناسایی و نسبت به نقاط ضعف و قوت هنرجو در پاسخ به سؤال آزمون کلاسی توضیح‌های مختصر و کلی نسبت به ضعف و قوت هنرجو داده می‌شود.

و توضیح داده می‌شود از آنجایی که درس محاسبات فنی تخصصی جزو دروس امتحانی نهایی می‌باشد، بهتر است همکاران محترم در حین حل سؤالات جزئیات بارم‌بندی را نیز برای هنرجویان مشخص کنند و یادآور شوند که برای نوبت اول و دوم از فصل اول چند نمره در امتحان خواهد آمد (طبق جدول ۲ صفحه ۱۰).

۱/

الف) $A = ۰/۳۵ \times ۰/۵ = ۰/۱۷۵m^2 \quad (۰/۵) \qquad \frac{Q}{t} = \frac{k.A(\Delta\theta)}{d} \quad (۰/۵)$

$$\frac{Q}{t} = ۰/۹۲ \times \frac{۰/۱۷۵ \times (۱۴۵۰ - ۴۰)}{۰/۲۴} \Rightarrow \frac{Q}{t} = ۹۴۵/۸۷۵W \quad (۰/۵) \quad \Rightarrow \frac{Q}{t} = \frac{۹۴۵/۸۷۵}{۱/۱۶۳} = ۸۱۳/۳۰\frac{kcal}{hr} \quad (۰/۵)$$

ب) $\frac{\Delta\theta}{d} = \quad (۰/۵) \quad tag\theta = \frac{۱۴۵۰ - ۴۰}{۲۴} = ۵۸/۷۵\frac{c}{cm} \quad (۰/۵) \quad \Rightarrow \frac{\Delta\theta}{d} = \frac{۱۴۱۰۱}{۰/۲۴} = ۵۸۷۵\frac{c}{m} \quad (۰/۵)$

ج) $q = ۰/۹۲ \times ۵۸۷۵ = ۵۴۰۵\frac{w}{m^2} \quad (۰/۵) \qquad \Rightarrow q = \frac{۵۴۰۵}{۱/۱۶۳} = ۴۶۴۷/۴۶\frac{kcal}{m^2.hr} \quad (۰/۵)$

د) $\sigma = \frac{K}{d} \quad (۰/۵) \quad \sigma = \frac{۰/۹۲}{۰/۲۴} = ۳/۸۳۳\frac{w}{m^2.c} \quad (۰/۵)$

$R = \frac{d}{k} \quad (۰/۵) \quad R = \frac{۰/۲۴}{۰/۹۲} = ۰/۲۶۱\frac{m^2\ ^\circ C}{w} \quad (۰/۵)$ یا

$$\Rightarrow R = \frac{۱}{\sigma} = \frac{۱}{۳/۸۳۳} = ۰/۲۶۱\frac{m^2.C}{w}$$

۲/

$$K_{eq}=\frac{d(d_۱+d_۲)}{\frac{d_۱}{k_۱}+\frac{d_۲}{k_۲}}\quad (۱)\Rightarrow K_{eq}=\frac{۱۰+۱۳}{\frac{۱۰}{۰/۰۰۲}+\frac{۱۳}{۰/۰۰۱۵}}\quad (۰/۵)$$

$$\Rightarrow K_{eq}=۰/۰۰۱۶۸\frac{cal}{cm.c.s}\quad (۰/۵)$$

$$A=a\times b\quad (۰/۵)\qquad \Rightarrow A=۶۰\times ۴۰\Rightarrow A=۲۴۰۰cm^۲\quad (۰/۵)$$

$$Q=K_{eq}\frac{A(\theta_۲-\theta_۱)t}{d(d_۱+d_۲)}\quad (۱)\quad \Rightarrow Q=۰/۰۰۱۶۸\frac{۲۴۰۰(۱۰۰۰-۱۰۰)۶۰}{۲۳}\quad (۰/۵)$$

$$\Rightarrow Q=۹۴۶۶/۴۳۴\,cal\quad (۰/۵)$$

۳/

$$K_{eq}=\frac{۱}{\frac{۱}{K۱}\times\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}+\frac{۱}{K_۲}\times\frac{D_۲-D_۳}{D_۲+D_۳}}\quad (۱)\quad \Rightarrow K_{eq}$$

$$=\frac{۱}{\frac{۱}{۰/۰۰۲}\times\frac{۱۵۰-۱۳۰}{۱۵۰+۱۳۰}+\frac{۱}{۰/۰۰۱۵}\times\frac{۱۳۰-۱۰۰}{۱۳۰+۱۰۰}}\quad (۱)$$

$$K_{eq}=۰/۰۰۸۱۵\frac{cal}{cm.c.s}\quad (./۵)$$

$$Q=\pi K_{eq}Lt(\theta_۲-\theta_۱)\quad (۱)$$

$$Q=۳/۱۴\times ۸/۱۵\times ۱۰^{-۳}\times ۱۲۰\times ۳۶۰۰\times(۱۰۰۰-۱۰۰)\quad (۰/۵)\quad \Rightarrow Q=۹/۹۶\times ۱۰^۶cal\quad (۰/۵)$$

$$Q=K\frac{\pi Lt\Delta\theta}{\frac{D_۱-D_۲}{D_۱+D_۲}}\quad (۱/۵)\quad \Rightarrow ۹/۹۶\times ۱۰^۶=۰/۰۰۲\frac{۳/۱۴\times ۱۲۰\times ۳۶۰۰\times \Delta\theta}{\frac{۱۵۰-۱۳۰}{۱۵۰+۱۳۰}}\quad (۱)$$

$\Delta\theta = ۲۶۲ \Rightarrow \Delta\theta = \theta_۲ - \theta_۱$ (۰/۵) $\Rightarrow ۲۶۲ = \theta_x - ۱۰۰$ (۰/۵) $\Rightarrow \theta_x = ۲۶۲ + ۱۰۰ \Rightarrow \theta_x = ۳۶۲C$ (۰/۵)

(چون تعداد سؤال کم بود به هر مورد نمره نسبتاً بالایی تعلق گرفت)

فصل دوم

انبساط و انقباض اجسام

در این فصل هنرجویان با مفهوم انبساط و انقباض اجسام و انواع انبساط و انقباض از جمله انقباض خطی ؛انقباض سطحی و انقباض حجمی آشنا می‌شوند. و محاسبات مربوط به هریک از انبساط‌های خطی، انبساط سطحی و انبساط حجمی را انجام می‌دهند. با اجسام ایزوتروپ و انیزوتروپ و تفاوت‌های آنها آشنا می‌شوند. محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض خطی و ابعاد مدل، با توجه به اضافه مجاز انقباض خطی (تئوری) را انجام می‌دهند. با تغییرات چگالی اجسام در دماهای متفاوت آشنا شده و آنها را محاسبه می‌کنند. با درصد کاهش حجم جسم آشنا شده و مقدار درصد کاهش حجم جسم را نسبت به چگالی در درجات حرارتی متفاوت محاسبه می‌کنند.

دانسته‌های قبلی

هنرجویان در دوره راهنمایی و دوره متوسطه با مفهوم انبساط و انقباض اجسام آشنا شده‌اند. چگالی و مفهوم آنرا در سال دوم هنرستان آموخته‌اند و مقدار چگالی را محاسبه می‌کنند.

واژه‌ها و اصطلاحات اصلی درس

تعریف انبساط: هنگامی که به جسمی حرارت داده می‌شود، ابعاد آن و درنتیجه حجم جسم افزایش می‌یابد این افزایش حجم را انبساط گویند.

تعریف انقباض: هنگامی که به جسمی سرما داده می‌شود ابعاد آن و درنتیجه حجم جسم کاهش می یابد این کاهش حجم را انقباض گویند.

ضریب انبساط خطی (α)**:** ازدیاد طول با افزایش یک درجه سانتی‌گراد (یا کلوین یا فارنهایت) را ضریب انبساط خطی گویند.

انبساط ظاهری: اگر یک مقداری مایع در ظرف حرارت داده شود علاوه‌بر مایع ظرف محتوی مایع نیز منبسط می‌شود در این حالت انبساط مایع بخاطر انبساط ظرف کمتر به نظر می‌رسد که به آن انبساط ظاهری گویند.

انبساط حقیقی: مجموع انبساط ظرف و انبساط مایع را انبساط حقیقی گویند.

درصد اضافه مجاز انقباض تئوری ($S\%$)**:** رابطه‌ای که با آن می‌توان مقدار کوچکتر شدن قطعات را محاسبه نمود.

جدول زمان‌بندی پیشنهادی درس محاسبات فنی تخصصی رشته متالورژی
فصل دوم

شماره هفته	فصل	عنوان	صفحات	محل انجام فعالیت
ششم	دوم	تعریف انواع انبساط و انقباض خطی، سطحی و حجمی. روابط انبساط خطی روابط انبساط سطحی و حجمی	۳۰-۲۶	در کلاس
هفتم	دوم	انبساط ظاهری و حقیقی مایعات. محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض. محاسبه ابعاد مدل. درصد اضافه مجاز انقباض عملی تغییرات چگالی	۳۸ـ۳۰	در کلاس
هشتم	دوم	حل مسائل باقیمانده فصل دوم و رفع اشکال و آزمون فصل	۴۲ـ۳۹	در کلاس

هدف کلی این فصل:

آشنایی با محاسبات مربوط به تغییر ابعاد اجسام در اثر حرارت

هفته ششم: تعریف انواع انبساط و انقباض خطی، سطحی و حجمی و روابط انبساط خطی و سطحی و حجمی

این جلسه مربوط به تدریس صفحات ۲۶ تا ۳۰ کتاب است و به قسمت‌های زیر تقسیم می‌گردد:

۱ـ تصحیح آزمون کلاسی فصل اول و واردکردن نمرات در دفتر کلاسی، حضور و غیاب و احیاناً توضیح برخی از سؤالات مربوط به پاسخ آزمون فصل اول و رفع اشکال

۲ـ تعریف انبساط و انقباض و ارتباط آن با ریخته‌گری قطعات

۳ـ تعریف انواع انبساط، خطی یا طولی، سطحی، حجمی و ایزوتروپ ، انیزوتروپ

۴ـ روابط انبساط خطی یا طولی، حل چند مسئله نمونه از این روابط

۵ـ روابط انبساط سطحی، حل مسئله

۶ـ روابط انبساط حجمی، حل مسئله

۷ـ خلاصه درس و دادن تکلیف برای جلسه آینده

تمامی مطالب عنوان شده به نحوی به فصل سوم کتاب اصول متالورژیکی ربط داده شود.

قسمت اول درس

پس از رفع اشکال تخته پاک شده عنوان درس فصل دوم نوشته می‌شود.

قسمت دوم درس

عنوان درس این جلسه «انبساط و انقباض» اجسام بخصوص در ریخته‌گری می‌باشد.

در همین حال عنوان درس روی تخته نوشته می‌شود.

هنرآموز با این سؤال که انبساط و انقباض چیست، چه تعریفی از آن را می‌دانید و علت علمی انبساط و انقباض چیست؟ ذهن هنرجویان را به درس جدید متوجه می‌کند.

به هنرجویان فرصت داده می‌شود تا نظرات خود را بدون همهمه و با توجه به سایر هنرجویان به گفته هم‌کلاسیشان ابراز کنند. از لابلای صحبت‌های هنرجویان جوابی را انتخاب کرده و علت درست یا نادرست بودن آنرا از سایرین می‌خواهد به جواب‌های درست تشویقی و یا نمره مثبت در دفتر کلاسی منظور می‌گردد.

سپس بر روی تخته این جملات نوشته می‌شود.

انبساط در لغت به معنای بازشدن، گسترده‌شدن، پهناورگردیدن است و انقباض به معنای درهم‌کشیدن و بهم کشیدن است[۱].

توضیح داده می‌شود علت انبساط و انقباض اجسام را بطورکلی می‌توان به انرژی نسبت داد که یکی از حالت‌های این انرژی حرارت است، یعنی با دادن حرارت می‌توانیم در جسم انبساط به‌معنی بازشدن ایجاد کنیم و

۱ــ فرهنگ فارسی معین دکتر محمد معین

با گرفتن حرارت یعنی سردکردن انقباض به معنی درهم‌کشیده شدن در جسم ایجاد کنیم.

برای درک انبساط و انقباض دراثر سرد و گرم شدن مثال خود انسان می‌تواند زده شود که در هنگام گرما پاها و دست‌ها را باز می‌کنیم و سر را بالا می‌گیریم. اما در هنگام سرما پاها و دست‌ها را جفت کرده و سر را در گریبان می‌فشاریم. نمادی از انبساط در هوای گرم و انقباض در هوای سرد می‌باشد.

این مطلب را می‌توان در مورد قطعه ریخته‌گری شده تشبیه کرد. موقع سردشدن قطعه پس از انجماد تا دمای محیط همراه با کاهش درجه حرارت ابعاد آن نیز دراثر انقباض کاهش می‌یابد، از آنجایی‌که در نهایت قطعه در دمای محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد باید قالب را طوری بسازیم که قطعه نهایی با نیاز مشتری تطابق داشته باشد.

انبساط یا انقباض از نکات مهم در طراحی قطعات و طراحی قالب یا مدل است که باید توجه ویژه‌ای به آن مبذول داشت.

هنرآموز متذکر می‌شود که در درس رسم مدل و قالب این محاسبات برای یک مدل انجام می‌شود.

با توجه به شرایط کلاس، چنانچه نیاز به توضیحات بیشتر بود، می‌توانید هنرجو را به فصل سوم کتاب اصول متالورژیکی ارجاع دهید.

قسمت سوم درس

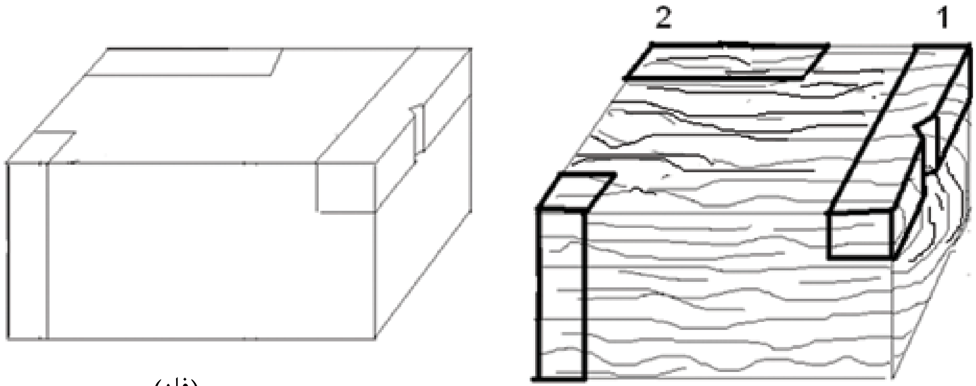
در همین حال هنرآموز مربوطه توضیح می‌دهد که حالا که فهمیدیم در قطعات ریخته‌گری شده انقباض و انبساط بوجود می‌آید، آیا انقباض فقط در طول قطعه اتفاق می‌افتد آیا در پهنا و ابعاد دیگر اتفاق نمی‌افتد؟

در همین حال روی تخته این عبارت نوشته می‌شود.

با گرم‌شدن جسم، دامنه اتم‌ها یا مولکول‌ها از هم فاصله می‌گیرند. از این رو ابعاد جسم بزرگ و به عبارت دیگر منبسط می‌شود. بنابراین اگر جسمی را در تمام نقاط به یک اندازه گرم کنیم نه‌تنها طول آن زیاد می‌شود (انبساط خطی یا طولی) بلکه سطح و حجم آن نیز افزایش می‌یابد (انبساط سطحی و انبساط حجمی).

ایزوتروپ و انیزوتروپ (isotrop & anisotrop)

چنانچه جسم در تمام جهت‌ها، خواص فیزیکی و مکانیکی یکسانی داشته باشد ایزوتروپ نامیده می‌شود، مانند فلزات، اما اگر خواص فیزیکی و مکانیکی در تمام جهات یکسان نباشد بلکه یک جهت نسبت به جهت دیگر متفاوت باشد انیزوتروپ گویند. مانند چوب که انبساط در جهت الیاف و عمود بر الیاف تقریباً ۵ برابر با هم اختلاف دارند. یعنی انبساط طولی نمونه شماره دو (۲) تقریباً پنج برابر نمونه شماره یک (۱) در شرایط مساوی خواهد بود.



(فلز)

(چوب)

شکل ۱-۶

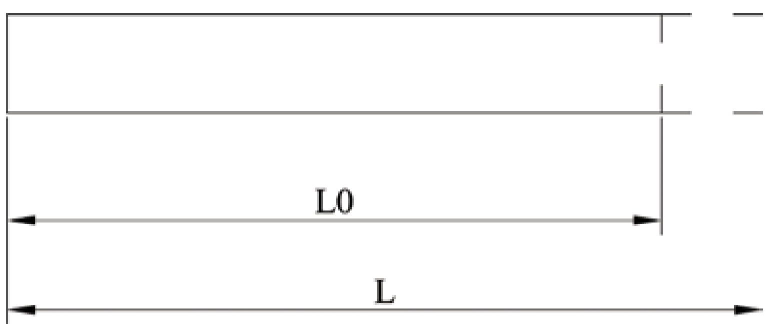
قسمت چهارم درس

پس از این توضیحات روی تخته این مطلب نوشته می‌شود.

روابط انبساط خطی یا طولی: همانگونه که قبلاً توضیح داده شد دراثر حرارت یکنواخت به یک جسم انبساطی همه‌جانبه در جسم پدید می‌آید، در این قسمت می‌خواهیم یکی از این روابط که انبساط طولی است را محاسبه کنیم، سایر روابط انبساط در جلسات بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.

یک میله فلزی را در نظر بگیرید، انبساط طولی برای میله‌های فلزی که دراثر تغییرات دمایی طول آنها تغییر می‌کند صادق است. البته انبساط سطحی و حجمی نیز در میله‌ها بوجود می‌آید ولی چون مقدار آنها بسیار، بسیار ناچیز است از آن صرف نظر کرده و فقط انبساط طولی که مقدار آن قابل ملاحظه است مد نظر قرار می‌گیرد.

پس از این توضیح شکل زیر روی تخته کشیده می‌شود.



شکل ۲-۶

چنانچه طول یک میله فلزی در صفر درجه سانتی‌گراد برابرL_0 و درθ درجه سانتی‌گراد L فرض شود در این صورت مقدار افزایش طول میله(ΔL) متناسب باθخواهد بود. به عبارت ریاضی و این روابط روی تخته نوشته

می‌شود.

(دلتا) همیشه اختلاف دو عبارت جلوی آنرا می‌رساند $\Delta=$ $\qquad$ $\Delta L=\alpha L_0\theta$

$\Delta L = L - L_0$

$L - L_\circ = \alpha L_\circ \theta \Rightarrow L = L_\circ + \alpha L_\circ \theta \Rightarrow L_\circ$ فاکتور از $\Rightarrow L = L_\circ(۱+\alpha\theta)$

این رابطه زمانی صادق است که θ کوچک باشد.

روی تابلو هریک از پارامترهای رابطه بالا معرفی و نوشته می‌شود.

α: ضریب انبساط خطی (در جدول ۱ـ۲ کتاب آمده) واحد آن $\frac{۱}{C}$ یا $\frac{۱}{K}$

L_0: طول اولیه (طولی که در دمای اولیه قرار داشته)

L: طول ثانویه (طولی که بعد از گرم‌کردن قطعه دارد)

و از آنجایی که دما همیشه صفر درجه نمی‌باشد، بنابراین یک فاصله دمایی تعریف می‌کنیم که یک رابطه کلی برای هر فاصله دمایی داشته باشیم و با این رابطه بتوانیم در دماهای مختلف ابعاد یا طول نمونه را معین کنیم.

بر روی تخته نوشته شود

چنانچه فاصله دمایی از $\theta_۱$ تا $\theta_۲$ (به‌ترتیب دمای اولیه و دمای ثانویه) باشد در این صورت α ثابت نیست (صفحه ۲۸ کتاب) و باید α متوسط بدست آید، بنابراین رابطه قبلی بصورت زیر نوشته می‌شود.

$L_۲ = L_۱(۱+\alpha\Delta\theta) \Rightarrow L_۲ = L_۱\{۱+\alpha(\theta_۲-\theta_۱)\}$

$L_۲$: طول ثانویه یا طول بعد از انبساط (انقباض) میله در دمای $\theta_۲$ درجه

$L_۱$: طول اولیه در دمای $\theta_۱$ درجه

α: ضریب انبساط طولی متوسط

بعد از این توضیحات مثال زیر روی تخته نوشته شده و با توضیحات کاربردی حل می‌شود.

مثال: طول یک میله آلومینیمی در $\circ^\circ C$ برابر $۸\circ cm$ است، افزایش طول آنرا برحسب میلیمتر در $۱۶\circ^\circ C$ چه اندازه است؟ $\alpha = ۲۴/۵\times۱\circ^{-۶}$ در ابتدا صورت مسئله برای هنرجو تفهیم شود.

در صورت مسئله افزایش طول در $۱۶\circ^\circ C$ خواسته شده، بنابراین ابتدا باید محاسبه کنیم در ۱۶۰ درجه سانتیگراد طول آن چقدر می‌شود، سپس طول $۱۶\circ^\circ C$ را از طول $\circ^\circ C$ کم می‌کنیم افزایش طول بدست خواهد آمد.

طبق روال حل مسائل فصل اول معلومات و مجهولات مسئله در یک طرف نوشته شده سپس حل می‌شود

$L_۲ = L_۱(۱+\alpha\Delta\theta) \Rightarrow L_۲ = L_۱(۱+\alpha(\theta_۲-\theta_۱))$ $\qquad$ $\theta_۱ = \circ C$

$L_۲ = ۸\circ\circ(۱+۲۴/۵\times۱\circ^{-۶}(۱۶\circ-\circ))$ $\qquad$ $L_۱ = ۸\circ cm = ۸\circ\circ mm$

$\Delta L = ?$ $\quad\quad L_۲ = ۸۰۰(۱ + ۰/۰۰۳۹۲)$

$\theta_۲ = ۱۶۰C$ $\quad\quad L_۲ = ۸۰۳/۱۳۶$

$\alpha = ۲۴/۵ \times ۱۰^{-۶} = ۰/۰۰۰۰۲۴۵$ $\quad\quad \Delta L = L_۲ - L_۱$

$L_۲ = ?$ $\quad\quad \Delta L = ۸۰۳/۱۳۶ - ۸۰۰$

$$\Delta L = ۳/۱۳۶\,mm$$

مثال: طول یک میله فلزی در صفر درجه سانتی‌گراد (مخلوط آب و یخ) برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر و در ۱۰۰ درجه سانتیگراد (آب جوش) برابر ۱۰۰۱/۵ میلی‌متر است. ضریب انبساط خط متوسط این فلز را بدست آورید.

$\theta_۱ = ۰C$ $\quad L_۱ = ۱۰۰۰mm$ $\quad \theta_۲ = ۱۰۰C$ $\quad L_۲ = ۱۰۰۱/۵mm$

$\alpha = ?$

$$L_۲ = L_۱(۱ + \alpha\Delta\theta) \Rightarrow ۱۰۰۱/۵ = ۱۰۰۰(۱ + \alpha(۱۰۰ - ۰)) \Rightarrow ۱۰۰۱/۵ = ۱۰۰۰(۱ + ۱۰۰\alpha)$$

$$\frac{۱۰۰۱/۵}{۱۰۰۰} = (۱ + ۱۰۰\alpha) \Rightarrow ۱/۰۰۱۵ = (۱ + ۱۰۰\alpha)$$

معلوم‌ها یک طرف و مجهولات طرف دیگر

$$۱/۰۰۱۵ - ۱ = ۱۰۰\alpha \Rightarrow ۰/۰۰۱۵ = ۱۰۰\alpha \Rightarrow$$

(یادآوری از فصل اول) تقسیم بر ضریب مجهول

$$\frac{۰/۰۰۱۵}{۱۰۰} = \alpha \Rightarrow \alpha = ۰/۰۰۰۰۱۵ \quad \alpha = ۱/۵ \times ۱۰^{-۶}$$

برای اینکه این فرمول را هنرجویان بهتر بفهمند مثال دیگری از تمرینات آخر فصل حل می‌شود.

مسئله ۱ تمرین آخر فصل دوم کتاب

$L_۲ = ?$ $\quad\quad L_۲ = L_۱(۱ + \alpha\Delta\theta) \Rightarrow L_۲ = L_۱(۱ + \alpha(\theta_۲ - \theta_۱))$

$L_۱ = ۱m$ $\quad\quad L_۲ = ۱(۱ + ۱۷ \times ۱۰^{-۶}(۱۱۸ - ۲۵))$

$\theta_۱ = ۲۵C$ $\quad\quad L_۲ = ۱(۱ + ۰/۰۰۱۵۸)$

$\theta_۱ = ۱۱۸C$ $\quad\quad L_۲ = ۱/۰۰۱۵۸$

$\alpha = ۱۷ \times ۱۰^{-۶} = ۰/۰۰۰۰۱۷$

این مسئله را از راه دیگری نیز می‌توان حل کرد

راه‌حل دوم برای این مسئله

$$L = L_۰(۱ + \alpha\theta)$$

$$L_{۲۵} = L_۰(۱ + ۱۷ \times ۱۰^{-۶} \times ۲۵)$$

$$L_{۲۵} = ۱/۰۰۰۴۲۵L_۰$$

$$L_{۱۱۸} = L_۰(۱ + ۱۷ \times ۱۰^{-۶} \times ۱۱۸)$$

$$L_{118} = 1/002006 L_0$$

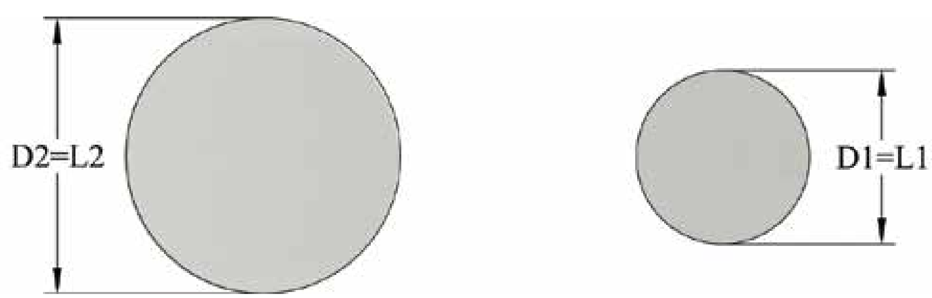
$$\frac{L_{118}}{L_{25}} = \frac{1/002006 L_0}{1/000425 L_0} \Rightarrow \frac{L_{118}}{1} = \frac{1/002006}{1/000425}$$

$$L_{118} = \frac{1 \times 1/002006}{1/000425} \Rightarrow L_{118} = 1/00158 m$$

همانگونه که همکاران محترم می‌دانند و در بخش نخست هم این مطلب گفته شده تمرینات و حل تمرینات باید برای هنرجو انفرادی باشد تا تفاوت‌های فردی هنرجویان در نظر گرفته شود. علت بیان این مطلب این است که نیازی نیست هر دو روش برای هنرجویان حل شود زیرا ممکن است موجب گمراهی هنرجویان گردد. همکاران محترم با توجه به شرایط و وضعیت هنرجویان کلاس می‌توانند راه‌حل‌های دیگر را بصورت انفرادی به هنرجویی که تمایل به یادگیری بیشتری دارد و کنجکاوتر است ارائه نمایند.

هنرآموز با بیان اینکه آیا سؤالی از این مسئله وجود دارد تا در مورد آن توضیح داده شود. ادامه می‌دهد که این مسئله و سایر مسائل مربوط به درس محاسبات تنها با یک راه‌حلی که اینجا عنوان گردید حل نمی‌گردند بلکه می‌توان از راه‌های دیگر نیز مسائل را حل کرد، اما بدلیل کمبود وقت و جلوگیری از گمراهی هنرجویان راه‌های دیگر را عنوان نکرده اما اگر هنرجویی تمایل به حل از راه دیگر دارد می‌تواند مراجعه کند تا راه‌های دیگر نیز به‌صورت اختصاصی به آن هنرجو گفته شود.

بعد از فرصت‌دادن به هنرجو جهت نوشتن مطالب؛ تخته پاک شده و این سؤال مطرح می‌شود که اگر بجای طول بخواهیم قطر یک میله را بدست آوریم از چه راهی باید حل شود. سپس شکل زیر روی تخته رسم می‌گردد.



شکل ۳-۶

و اینگونه توضیح داده می‌شود که اگر مقطع یک میله را ببینیم قطر اولیه $D_۱$ را می‌توانیم برابر با $L_۱$ و قطر پس از انبساط $D_۲$ را همان $L_۲$ در نظر بگیریم، بنابراین می‌توانیم از رابطه قبلی استفاده کرده بجای $L_۱$ و $L_۲$ مقدارمساوی $D_۱$ و $D_۲$ را قرار دهیم. بنابراین رابطه به این صورت نوشته می‌شود.

$$D_۲ = D_۱(۱+\alpha\Delta\theta) \Rightarrow D_۲ = D_۱(۱+\alpha(\theta_۲-\theta_۱))$$

مثال: مسئله ۲ تمرین آخر فصل دوم

$D_۰ = D_۱ = ۲۵mm$

$\Delta D = ?$

$\alpha = ۱۲/۵\times۱۰^{-۶} = ۰/۰۰۰۰۱۲۵$

$\theta_۱ = -۳۰C \qquad \theta_۲ = +۴۰C$

$$D_۲ = D_۱(۱+\alpha(\theta_۲-\theta_۱))$$

$$D_۲ = ۲۵(۱+۱۲/۵\times۱۰^{-۶}(۴۰-(-۳۰))$$

$$D_۲ = ۲۵(۱+۰/۰۰۰۸۷۵) \Rightarrow D_۲ = ۲۵/۰۲۱۸$$

$$\Delta D = ۲۵/۰۲۱۸ - ۲۵ \Rightarrow \Delta D = ۰/۰۲۱۸$$

راه‌حل دوم این مسئله

$$D = D_۰(۱+\alpha\theta)$$

$$D_{۴۰} = ۲۵(۱+۱۲/۵\times۱۰^{-۶}\times۴۰)$$

$$D_{۴۰} = ۲۵/۰۱۲۵$$

$$D_{-۳۰} = ۲۵(۱+۱۲/۵\times۱۰^{-۶}\times(-۳۰))$$

$$D_{-۳۰} = ۲۴/۹۹۰۶$$

$$\Delta D = D_{۴۰} - D_{-۳۰} \Rightarrow \Delta D = ۲۵/۰۱۲۵ - ۲۴/۹۹۰۶$$

$$\Delta D = ۰/۰۲mm$$

قسمت پنجم درس: روابط انبساط سطحی

همانگونه که در ابتدای بحث گفته شد، تنها انبساط طولی در جسم بوجود نمی‌آید، بلکه انبساط سطحی (حجمی) نیز در جسم بوجود می‌آید بدینگونه که اگر یک سطح را در نظر بگیریم در تمامی جهات ابعاد جسم در حال بزرگ‌شدن هستند.

چنانچه صفحه‌ای را در نظر بگیریم که دارای سطحی قابل ملاحظه باشد (یعنی ابعاد نسبتاً بزرگ داشته باشد) و ارتفاع یا ضخامت قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد (یعنی نسبت به سطح، ضخامت بسیار کوچکی داشته باشد) بنابراین طبق استدلالی که برای انبساط طولی شد، چون ضخامت بسیار ناچیز است و ضریب انبساط هم عددی کوچک بنابراین می‌توان از انبساط ضخامت صرفنظر نمود. یعنی فقط انبساط سطح را در نظر بگیریم. رابطه انبساط سطحی به‌صورت زیر خواهد بود.

$$A_۲ = A_۱(۱+۲\alpha\Delta\theta) \Rightarrow A_۲ = A_۱(۱+\beta\Delta\theta)$$

$$\boxed{\beta = ۲\alpha}$$

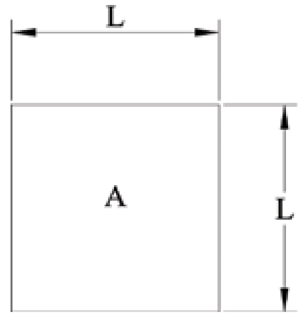
طبق این رابطه ضریب انبساط سطحی دو برابر ضریب انبساط خطی می‌باشد.

هنرجویان توجه داشته باشند که چنانچه ضریب انبساط خطی برای مسائل انبساط سطحی داده شد، باید این ضریب را در عدد دو ضرب کرده سپس در رابطه قرار دهند.

دانستنی‌های معلم

اثبات رابطه انبساط سطحی از رابطه انبساط خطی

اگر صفحه‌ای را در نظر بگیرید که هر طول آن برابر L باشد آنگاه می‌توانیم مساحت این صفحه را بصورت $A = L^۲$ بنویسیم.



شکل ۴-۶

بنابراین اگر رابطه $L_۲ = L_۱(۱+\alpha\Delta\theta)$ را به توان دو برسانیم در واقع رابطه انبساط سطحی را خواهیم داشت.

$$L_۲^۲ = L_۱^۲(۱+\alpha\Delta\theta)^۲ \Rightarrow L_۲^۲ = L_۱^۲(۱^۲ + ۲\alpha\Delta\theta \times ۱ + \alpha^۲\Delta\theta^۲)$$ (اتحاد نوع دوم)

از آنجایی که α برای اکثر مواد بسیار کوچک بوده (جدول صفحه ۲۹) و از طرفی چنانچه در رابطه $((\alpha^۲\Delta\theta^۲))$ به توان دوم برسد، عددی بسیار بسیار کوچک می‌شود (مثلاً عدد ۳×۱۰^{-۶} به توان ۲ برسد ، ۹×۱۰^{-۱۲} می‌شود) بنابراین می‌توان رابطه $(\alpha^۲\Delta\theta^۲)$ را صفر فرض کرد، پس رابطه بالا بصورت

$$L_۲^۲ = L_۱^۲(۱^۲ + ۲\alpha\Delta\theta)$$

طبق رابطه بالا که $A = L^۲$ می‌توانیم مقدار مساوی آنرا در رابطه قرار دهیم.

$$A_۲ = A_۱(۱+۲\alpha\Delta\theta) \Rightarrow A_۲ = A_۱(۱-\beta\Delta\theta)$$

$$\beta = ۲a$$

مثال: یک ورق آهنی به شکل مستطیل را که طول و عرض آن در $۲۵^\circ C$ به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۸ متر است تا $۱۲۰^\circ C$ گرم کرده ایم، مطلوبست تعیین سطح ورق بعد از انبساط برحسب سانتی‌متر مربع، درصورتی که ضریب انبساط خطی متوسط آهن $\alpha = ۱۲/۵\times۱۰^{-۶}$ باشد.

$\alpha = ۱۲/۵ \times ۱۰^{-۶} \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۱۲۵$ $\quad \theta_1 = ۲۵^\circ C \quad \theta_2 = ۱۲۰^\circ C$

$\beta = ۲\alpha \Rightarrow \beta = ۲ \times ۱۲/۵ \times ۱۰^{-۶} \quad \beta = ۲۵ \times ۱۰^{-۶}$

$a = ۰/۸m \Rightarrow a = ۸۰cm$ چون سطح ورق را صورت مسئله برحسب سانتی‌مترمربع

$b = ۰/۴m \Rightarrow b = ۴۰cm$ خواسته بهتر است که ابتدا تبدیل انجام شود

$A_۱ = a \times b \Rightarrow A_۱ = ۸۰ \times ۴۰ \Rightarrow A_۱ = ۳۲۰۰cm^۲$

$A_۲ = ?$

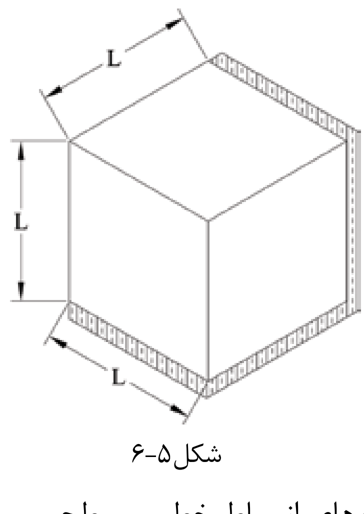
$A_۲ = A_۱(۱ + \beta\Delta\theta) \Rightarrow A_۲ = ۳۲۰۰(۱ + ۲۵ \times ۱۰ - ۶(۱۲۰ - ۲۵))$

$A_۲ = ۳۲۰۰(۱ + ۰/۰۰۲۳۷۵) \Rightarrow A_۲ = ۳۲۰۷/۶$

قسمت ششم درس: روابط انبساط حجمی

همان‌گونه که در مباحث قبلی (انبساط طولی و انبساط سطحی) عنوان شد، یکی از اندازه‌ها در محاسبات دخالت داده نمی‌شد، علت آنهم کوچک بودن اندازه مورد نظر بود زیرا با کوچک بودن اندازه α (جدول صفحه ۲۹) انبساط قابل ملاحظه‌ای بدست نمی‌آمد. و همانطورکه سابقاً توضیح داده شد دراثر انبساط و انقباض تمامی اندازه‌ها بزرگ یا کوچک می‌شوند، بنابراین حالا جسمی را در نظر می‌گیریم که اندازه‌های قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، در این صورت دراثر افزایش دما تمامی قسمت‌های جسم در حال بزرگ شدن هستند، که به آن انبساط حجمی می‌گویند. لازم به توضیح است که در مورد مایعات و گازها که شکل معینی ندارند نمی‌توان از انبساط خطی استفاده کرد و معمولاً انبساط آنها (یا انقباضشان) براساس انبساط حجمی محاسبه می‌گردد.

مکعب شکل زیر روی تابلو رسم می‌شود و افزایش حجم مربوط با گچ یا رنگ دیگری از وایت‌برد نشان داده می‌شود.



شکل ۵-۶

رابطه انبساط حجمی هم مانند رابطه‌های انبساط خطی و سطحی می‌باشد.

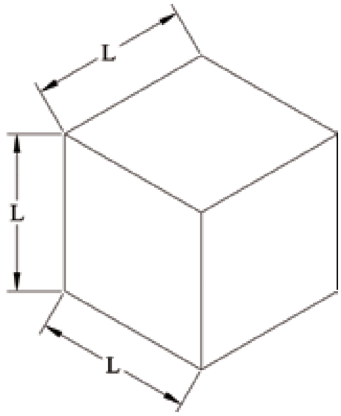
$V_۲ = V_۱(۱ + ۳\alpha\Delta\theta) \Rightarrow V_۲ = V_۱(۱ + \gamma\Delta\theta)$

$\gamma = ۳\alpha$

دانستنی‌های معلم

اثبات رابطه انبساط حجمی از رابطه انبساط خطی

اگر حجم جسمی را در نظر بگیریم که هریک از اندازه‌های آن برابر L باشد، یعنی طول، عرض و ارتفاع این جسم در حجم برابر L باشد، آنگاه حجم جسم برابر خواهد بود با $V=L^3$



شکل ۶-۶

$$L_2 = L_1(1+\alpha\Delta\theta)$$

اگر از رابطه انبساط طولی را به توان ۳ برسانیم در واقع انبساط حجمی را خواهیم داشت.

$$L_2^3 = L_1^3(1+\alpha\Delta\theta)^3 \quad \text{(اتحاد نوع سوم)}$$

$$L_2^3 = L_1^3(1^3 + 3\times 1^2 \times \alpha\Delta\theta + 3\alpha^2\Delta\theta^2 \times 1 + \alpha^3\Delta\theta^3) \Rightarrow$$

همانند استدلالی که برای انبساط طولی و انبساط سطحی عنوان شد، می‌توان نتیجه گرفت که عبارات $(3\alpha^2\Delta\theta^2)$, $(\alpha^3\Delta\theta^3)$ وقتی به توان ۲ و ۳ برسند (مثلاً عدد 3×10^{-6} به توان ۲ برسد 9×10^{-12} می‌شود و اگر به توان ۳ برسد 27×10^{-18} می‌شود) اعدادی بسیار بسیار کوچک می‌شود بنابراین می‌توان از عبارت فوق صرفنظر کرد پس رابطه بالا بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$L_2^3 = L_1^3(1^3 + 3\times 1^2 \times \alpha\Delta\theta) \Rightarrow L_2^3 = L_1^3(1+3\alpha\Delta\theta) \Rightarrow$$

طبق رابطه بالا که $V=L^3$ می‌توانیم مقدار مساوی آنرا در رابطه قرار دهیم.

$$V_2 = V_1(1+3\alpha\Delta\theta) \Rightarrow V_2 = V_1(1+\gamma\Delta\theta) \Rightarrow \gamma = 3\alpha$$

مثال: حجم یک گلوله فولادی در صفر درجه سانتی‌گراد ۲۵۱/۳ سانتی‌مترمکعب است حجم آن در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد چه اندازه خواهد بود؟

$\alpha = 1/28\times10^{-5}$

$V_1 = 251/3\,cm^3$

$\theta_1 = 0C$

$\theta = 450$

$A = ۱/۲۸ \times ۱۰^{-۵} \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۱۲۸$

$\gamma = ۳\alpha \Rightarrow \gamma = ۳ \times ۱/۲۸ \times ۱۰^{-۵}$ $\quad\quad \gamma = ۳/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$

$V_۲ = V_۱(\ + \gamma \Delta\theta)$

$V_۲ = ۲۵۱/۳(۱ + ۳/۸۴ \times ۱۰^{-۵}(۴۵۰ - ۰))$

$V_۲ = ۲۵۱/۳(۱ + ۰/۰۱۷۲۸)$

$V_۲ = ۲۵۵/۶۴ cm^۳$

قسمت هفتم درس

ـ امروز با مباحث زیر آشنا شدید:

۱ـ تعریف انبساط و انقباض و ارتباط آن با ریخته‌گری قطعات

۲ـ تعریف انواع انبساط، خطی یا طولی سطحی، حجمی و ایزوتروپ، انیزوتروپ

۳ـ با رابطه انبساط خطی یا طولی $(L_۲ = L_۱.(1 + \alpha.\Delta\theta))$ آشنا شده و نحوه محاسبه با آن را فرا گرفتید.

۴ـ رابطه انبساط سطحی و نحوه محاسبه با آن

$A_۲ = A_۱(۱ + ۲\alpha\Delta\theta) \Rightarrow A_۲ = A_۱(۱ + \beta\Delta\theta)$

$\boxed{\beta = ۲\alpha}$

۵ـ رابطه انبساط حجمی و نحوه حل مسئله با آن:

$V_۲ = V_۱(۱ + ۳\alpha\Delta\theta) \Rightarrow V_۲ = V_۱(۱ + \gamma\Delta\theta)$

$\gamma = ۳\alpha$

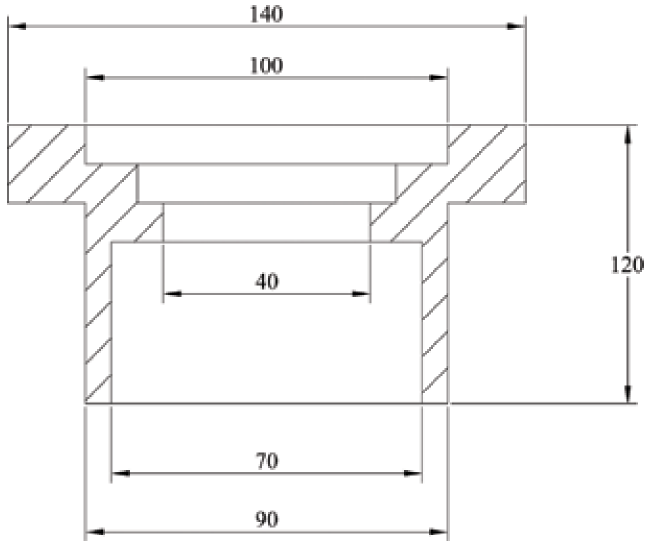
و سپس مسائل زیر به‌عنوان تکلیف جلسه آینده به هنرجویان داده شود.

۱ـ شکل صفحه بعد روی تخته رسم شود با توجه به این اطلاعات ابعاد ثانویه را محاسبه کنید.

(قطعه آلومینیومی)

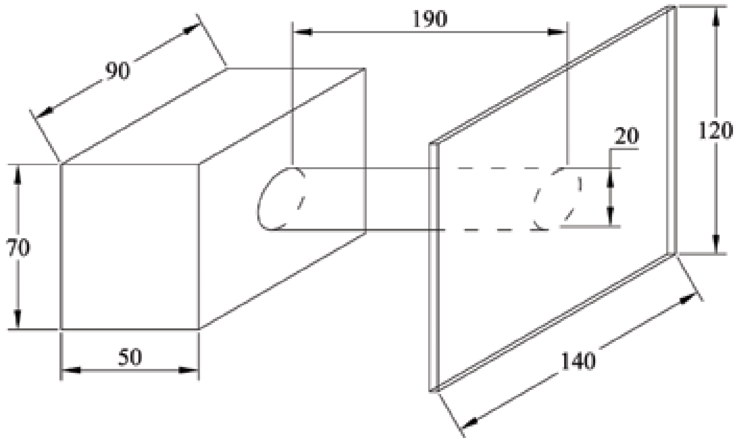
$\alpha =$ از جدول ۱ـــ۲ استخراج شود $\quad\quad D = ? \quad\quad \Delta D = ?$

$\theta_۱ = ۳۰C \quad\quad \theta_۲ = ۱۹۰C \quad\quad L = ? \quad\quad \Delta L = ?$



شکل۷-۶

۲ـ با توجه به شکل فرضی زیر انبساط هریک از اشکال را بطور جداگانه محاسبه کنید.



شکل۸-۶

(همیشه اندازه‌های یک نقشه برحسب میلیمتر می‌باشد) انبساط را برحسب cm بدست آورید،

دما از ۲۵ درجه تا ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. $\alpha = ۱/۵ \times ۱۰^{-۶}$

هفته هفتم: انبساط ظاهری و حقیقی مایعات. محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض. محاسبه ابعاد مدل و درصد اضافه مجاز انقباض عملی و تغییرات چگالی

این جلسه مربوط به تدریس صفحات ۳۰ تا ۳۸ کتاب است و به قسمت‌های زیر تقسیم می‌گردد.

۱- جمع‌آوری تکلیف جلسه قبل و حضور و غیاب
۲ـ امتحان کلاسی و پاسخ سؤال امتحان
۳ـ حل مسئله جلسه قبل
۴ـ انبساط آب
۵ـ انبساط ظاهری و حقیقی مایعات
۶ـ انقباض دراثر کاهش درجه حرارت
۷ـ محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض
۸ـ محاسبه ابعاد مدل
۹ـ درصد اضافه مجاز انقباض عملی
۱۰ـ تغییرات چگالی نسبت به انبساط و انقباض
۱۱ـ خلاصه درس و تکلیف جلسه آینده

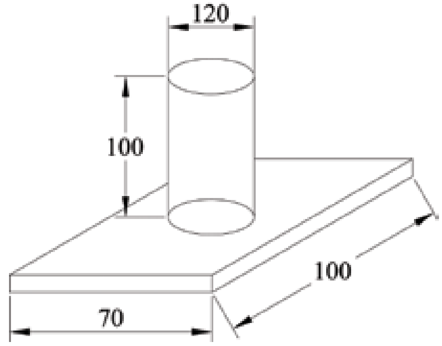
قسمت اول درس

پس از استقرار هنرجویان و توسط نماینده کلاس تکالیف جمع‌آوری شده، هنرجویانی که تکلیف آماده نکرده‌اند یک نمره منفی در دفتر حضور و غیاب برای آنان ثبت می‌شود. چنانچه هنرجویی تکالیف جلسات قبل را نیز به اضافه تکلیف این جلسه آماده نکرده بود به دفتر یا به معاون هنرستان معرفی، تا وضعیت این هنرجو روشن شود، بطوری که خانواده‌ها حتماً از وضعیت پیشرفت تحصیلی فرزند خود مطلع شوند. در حین جمع کردن تکالیف توسط نماینده کلاس حضور و غیاب نیز انجام می‌شود.

قسمت دوم درس

در برگه‌های A۵ تهیه شده از قبل آزمون کلاسی گرفته می‌شود. سعی شود سؤالات تایپ شده واضح بوده تا هیچگونه سؤالی از طرف هنرجویان نباشد.

نام و نام خانوادگی .... زمان ۱۵ دقیقه (استفاده از ماشین حساب آزاد است)
انبساط سطحی و حجمی شکل زیر را برحسب متر بدست آورید $\theta_1 = ۲۵$ $\theta_۲ = ۵۲۵$
$\alpha = ۲۰ \times ۱۰^{-۶}$



شکل ۱-۷

پس از جمع‌آوری برگه‌های امتحانی جواب سؤال امتحان داده می‌شود.

ابتدا حجم استوانه سپس سطح ورق زیر استوانه محاسبه می‌شود.

کلیه اندازه‌ها باید تبدیل به متر شوند بنابراین تقسیم بر ۱۰۰۰ می‌شوند.

$$V_۲ = V_۱(۱+\gamma\Delta\theta) \Rightarrow$$

$$\text{حجم استوانه}\quad V_۱ = \frac{\pi d^۲}{۴}\times h \Rightarrow V_۱ = \frac{۳/۱۴\times(۰/۱۲)^۲}{۴}\times ۰/۱$$

$$V_۱ = ۰/۰۰۱۱۳m^۳$$

$$\alpha = ۲۰\times ۱۰^{-۶} \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۲ \Rightarrow \gamma = ۳\alpha \Rightarrow \gamma = ۳\times ۲۰\times ۱۰^{-۶} \Rightarrow \gamma = ۶۰\times ۱۰^{-۶}$$

$$V_۲ = ۰/۰۰۱۱۳(۱+۶۰\times ۱۰^{-۶}(۵۲۵-۲۵)) \Rightarrow V_۲ = ۰/۰۰۱۱۶۳۹m^۳$$

$$A_۲ = A_۱(۱+\beta\Delta\theta) \Rightarrow$$

$$\text{سطح ورق زیر استوانه}\quad A_۱ = a\times b \Rightarrow A_۱ = ۰/۱\times ۰/۰۷$$

$$A_۱ = ۰/۰۰۷m^۲$$

$$\beta = ۲\alpha \Rightarrow \beta = ۲\times ۲۰\times ۱۰^{-۶} \Rightarrow \beta = ۴۰\times ۱۰^{-۶}$$

$$A_۲ = ۰/۰۰۷(۱+۴۰\times ۱۰^{-۶}(۵۲۵-۲۵)) \Rightarrow A_۲ = ۰/۰۰۷۱۴m^۲$$

توجه همکار

هنرآموزان محترم می‌توانند برگه‌های امتحانی هر هنرجو را با هنرجویان بغل دستی عوض کرده و هنرجوی همکلاسی، برگه‌ها را تصحیح نماید چون جواب سؤال با بارم آن روی تخته نوشته می‌شود، هنرجو می‌تواند همانند حل روی تابلو برگه را تصحیح نماید.

این کار چند حسن دارد اول اینکه اگر هنرجویی امتحان را خوب نداده باشد، از نظر روانی موجب خجالت هنرجو نزد همکلاسی‌های خود شده و سعی می‌کند در امتحان بعدی خود را بهتر از این امتحان آماده کند.

دوم اینکه هنرجویان به ایرادات خود در حل مسئله پی می‌برند و این ایراد ممکن است توسط

همکلاسی هنرجو به گونه‌ای توضیح داده شود که موجب فهم هنرجو شود.

سوم اینکه هنرجویان وقتی از امتحان بیرون می‌آیند فکر می‌کنند نمره بسیار خوبی می‌گیرند، در حالی که هیچگاه به ایرادات خود توجه نمی‌کنند، با این کار هنرجو نمره واقعی خود را با توجه به ریزنمرات حدوداً می‌تواند حدس بزند.

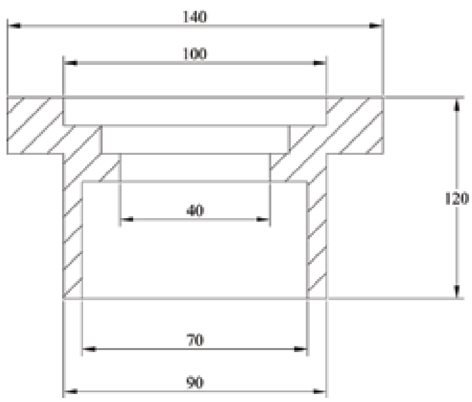
البته در این بین فرصت برای اعتراض به نمره‌های داده شده به هنرجویان داده می‌شود.

پس از انجام این کارها شکل مسئله جلسه قبل روی تابلو کشیده می‌شود و سپس از یکی از هنرجویانی که مسئله را حل کرده است خواسته می شود تا مسئله را بطور کامل حل کند.

سعی شود از هنرجویان جهت حل مسئله و توضیح آن استفاده شود، زیرا که هنرجویان با روشی دیگر مسئله را به همکلاسی‌های خود تفهیم می‌کنند از طرفی نقطه ضعف هنرجویان در قسمت‌های مختلف کاملاً مشخص می‌شود و هنرآموز می‌تواند روی این قسمت‌ها بیشتر توضیح دهد.

قسمت سوم درس: حل مسائل جلسه قبل

۱ـ توضیح داده می‌شود، از آنجایی که تمامی اندازه‌ها در این فاصله دمایی بزرگ می‌شود، بنابراین باید اندازه ثانویه تمامی اندازه‌ها جداگانه محاسبه شود.



شکل ۲-۷

داده‌های مسئله در گوشه‌ای از تابلو نوشته می‌شود.

$\theta_۱ = ۳۰C \qquad D_۱ = ۱۴۰ \qquad D_۲ = ۱۰۰ \qquad D_۳ = ۴۰$

$\theta_۲ = ۱۹۰C \qquad D_۴ = ۷۰ \qquad D_۵ = ۹۰$

$\alpha = ۲۴ \times ۱۰^{-۶} \qquad L = ۱۲۰$

$D_۲ = D_۱(۱ + \alpha\Delta\theta)$

$D_{۱۴۰} = ۱۴۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹ - ۳۰)) \Rightarrow D_{۱۴۰} = ۱۴۰/۵۳۷۶$

$D_{۱۰۰} = ۱۰۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹۰ - ۳۰)) \Rightarrow D_{۱۰۰} = ۱۰۰/۳۸۴$

$D_{۴۰} = ۴۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹۰ - ۳۰)) \Rightarrow D_{۴۰} = ۴۰/۱۵۳۶$

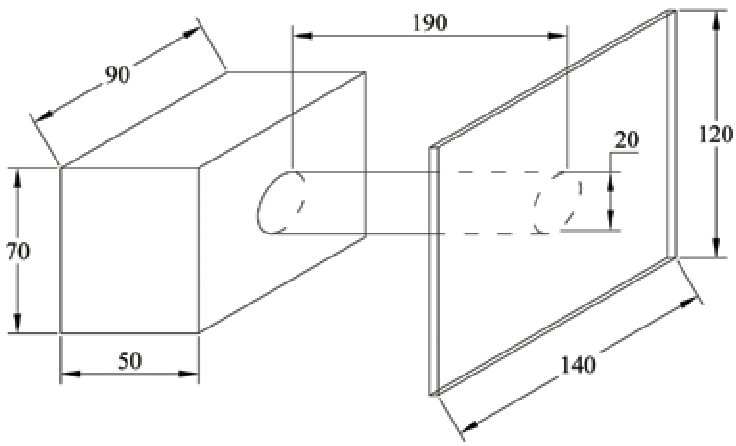
$D_{۷۰} = ۷۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹۰ - ۳۰)) \Rightarrow D_{۷۰} = ۷۰/۲۶۸۸$

$D_{۹۰} = ۹۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹۰ - ۳۰)) \Rightarrow D_{۹۰} = ۹۰/۳۴۵۶$

$L_۲ = L_۱(۱ + \alpha\Delta\theta)$

$L_۲ = ۱۲۰(۱ + ۲۴ \times ۱۰^{-۶}(۱۹۰ - ۳۰)) \Rightarrow L_۲ = ۱۲۰/۴۶۰۸$

۲ـ ابتدا شکل روی تابلو کشیده می‌شود.



شکل۳-۷

ابتدا حجم مکعب سپس طول و قطر میله و بعد از آن هم سطح ورق محاسبه می‌شوند.

چون ابعاد برحسب سانتیمتر خواسته شده بنابراین تمامی اندازه‌ها بر ۱۰ تقسیم می‌شوند.

$V_۲ = V_۱(۱ + \gamma\Delta\theta) \Rightarrow$

$V_۱ = a \times b \times c \Rightarrow V_۱ = ۹ \times ۷ \times ۵ \Rightarrow V_۱ = ۳۱۵cm^۳$

$\gamma = ۳a \Rightarrow \gamma = ۳ \times ۱/۵ \times ۱۰^{-۶} \Rightarrow \gamma = ۴/۵ \times ۱۰^{-۶}$

$V_۲ = ۳۱۵(۱ + ۴/۵ \times ۱۰^{-۶}(۷۸۰ - ۲۵))$

$V_۲ = ۳۱۶/۰۷۰۲cm^۳$

$L_۲ = L_۱(۱ + \alpha\Delta\theta)$

$L_۲ = ۱۹(۱ + ۱/۵ \times ۱۰^{-۶}(۷۸۰ - ۲۵))$

$L_۲ = ۱۹/۰۲۱۵cm$

$D_۲ = D_۱(۱ + \alpha\Delta\theta)$

$D_۲ = ۲(۱ + ۱/۵ \times ۱۰^{-۶}(۷۸۰ - ۲۵))$

$$D_{۲} = ۲/۰۰۲۲۶\,cm$$

$$A_{۲} = A_{۱}(۱+\beta\Delta\theta)$$

$$A_{۱} = a\times b \Rightarrow A_{۱} = ۱۴\times ۱۲ \Rightarrow A_{۱} = ۱۶۸\,cm^{۲}$$

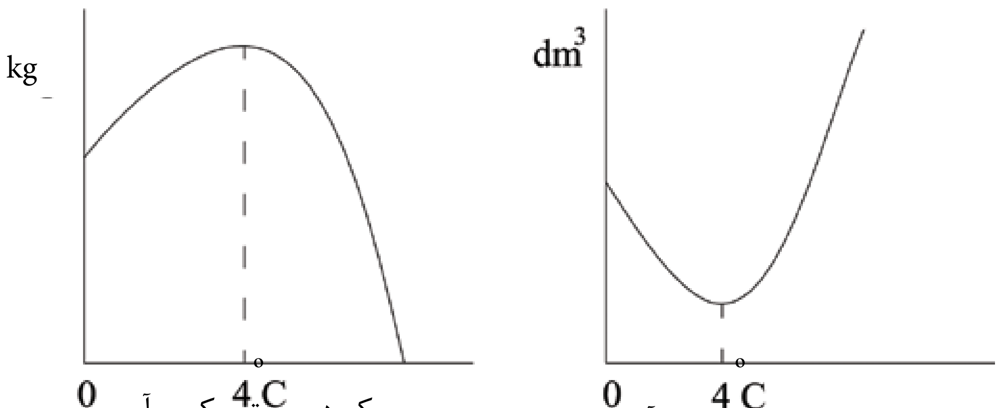
$$\beta = ۲\alpha \Rightarrow \beta = ۲\times ۱/۵\times ۱۰^{-۶} \Rightarrow \beta = ۳\times ۱۰^{-۶}$$

$$A_{۲} = ۱۶۸(۱+۳\times ۱۰^{-۶}(۷۸۰-۲۵))$$

$$A_{۲} = ۱۶۸/۳۸۰۵\,cm^{۲}$$

قسمت چهارم درس: انبساط آب

آب یک وضعیت خاص و استثنایی دارد بطوری که از صفر تا چهار درجه سانتیگراد حجم کاهش می‌یابد درحالی که از چهار درجه به بعد آب منبسط می‌شود.



جرم یک دسی‌متر مکعب آب — حجم یک کیلوگرم آب

شکل۴-۷

روی تابلو این شکل کشیده و این مطلب نوشته می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که (شکل ۱ـ۲ کتاب) طبق رابطه $\rho = \frac{m}{V}$ رابطه بین جرم و حجم عکس همدیگر می‌باشند. زمانی که چگالی ثابت باشد با افزایش جرم، حجم کاهش می‌یابد.

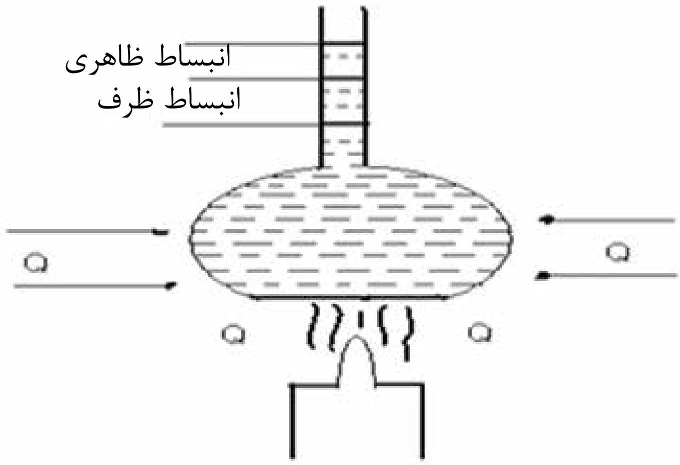
قسمت پنجم درس: انبساط ظاهری و حقیقی مایعات

چنانچه مایعی در ظرفی ریخته شود دراثر حرارت، ظرف و مایع درون آن دراثر تغییرات حرارتی انبساط می‌یابند برای یافتن انبساط حقیقی مایع باید انبساط ظرف را با انبساط ظاهری آن جمع کنیم.

انبساط واقعی، یعنی افزایش حجم کلی مذاب یا مایع دراثر افزایش درجه حرارت. اما هنگامی که مایع همراه با ظرف آن گرم می‌شود ظرف و مایع تواماً انبساط می‌یابند یعنی گنجایش ظرف نیز افزایش حجم می‌یابد و لذا سطح مایع به اندازه‌ای که واقعاً (در صورت ثابت‌ماندن گنجایش ظرف) بایستی بالا بیاید، بالا نمی‌آید، لذا با اندازه‌گیری سطح مایع درون ظرف ظاهراً انبساط کمتری مشاهده می‌گردد.

انبساطی که از روی افزایش سطح مایع داخل ظرف مشاهده و اندازه‌گیری می‌شود را انبساط ظاهری می‌گویند.

سپس شکل زیر رسم شده و این مطلب روی تابلو نوشته می‌شود.



انبساط حقیقی = انبساط ظاهری مایع + انبساط ظرف

شکل۵-۷

در انبساط حقیقی هم انبساط مایع را به حساب می‌آوریم. هم انبساط ظرف را. ولی در انبساط ظاهری انبساط ظرف نیز در نظر گرفته می‌شود (مبحث انقباض حجمی در قطعات ریختگی فصل سوم کتاب اصول متالورژی)

قسمت ششم درس: انقباض در اثر کاهش درجه حرارت

قبل از شروع این بحث، هنرجویان را به فصل سوم مبحث ۱ـ۴ـ۳ انقباض حجمی در قطعات ریختگی کتاب اصول متالورژی ریخته‌گری ارجاع دهید.

انقباض اجسام نیز مانند انبساط آنها تابع درجه حرارت است با این تفاوت که وقتی از جسمی مقداری گرما گرفته می‌شود (سرد می‌شود) ابعاد جسم اعم از طول سطح و حجم کاهش می‌یابد.

در ریخته‌گری انقباض فلزات و آلیاژها در سه مرحله مورد بحث قرار می‌گیرد:

الف) انقباض در حالت مذاب: از درجه حرارت ریختن (فوق ذوب) تا نقطه انجماد فلز ادامه می‌یابد. برای جبران این انقباض در داخل قالب کافی است مقداری مذاب به آن اضافه شود.

$$\Delta V = V_m \gamma (\theta_۲ - \theta_۱)$$

$\Delta V =$ انقباض حجمی مذاب

$V_m =$ حجم محفظه قالب

$\gamma =$ ضریب انقباض حجمی

$\theta_۲ =$ دمای فوق ذوب

$\theta_1 =$ نقطه ذوب فلز

ب) انقباض حین انجماد (خمیری): هنگامی که مذاب تبدیل به جامد می‌شود به دلیل تغییر در چیده‌شدن اتم‌ها و نظم گرفتن آنها، حجم بشدت کاهش می‌یابد. در فلزات خالص پدیده انجماد در یک دما اتفاق می‌افتد ولی در حالت آلیاژی در یک محدوده دمایی اتفاق می‌افتد که در این حالت با کاهش دما که به‌تدریج مقدار جامد بیشتر می‌شود حجم هم بتدریج کاهش می‌یابد. میزان این انقباض که بصورت حجمی بیان می‌شود در فلزات مختلف متفاوت بوده و بین ۲ تا ۸ درصد می‌باشد.

این انقباض را می‌توان با طراحی صحیح سیستم‌های تغذیه‌گذاری جبران کرد. البته بعضی عناصر هستند که در هنگام انجماد بجای اینکه انقباض پیدا کنند انبساط پیدا می‌کنند مثل بیسموت، آنتیموان، چدن خاکستری و چدن با گرافیت کروی.

ج) انقباض در حالت جامد: پس از اینکه قطعه بطور کامل منجمد شد تا رسیدن فلز به درجه حرارت محیط ادامه دارد. در این مرحله با درنظرگرفتن اضافاتی بنام اضافه مجاز انقباض که در رسم فنی مدل و قالب نیز با آن آشنا هستید. این کمبود انقباضی بر روی مدل توسط طراح و مدلساز جبران می‌شود.

به هنرجریان گفته می‌شود:

این سه نوع انقباض را بطور مفصل‌تر در کتاب اصول متالورژی مبحث انقباض حجمی در قطعات ریختگی مورد بحث و بررسی قرار خواهید داد. در اینجا برای اینکه به مبحث بعدی برسیم باید این اطلاعات بطور مختصر داده می‌شد.

قسمت هفتم درس: محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض

همانگونه که در قسمت انقباض در حالت جامد بیان گردید، رابطه‌ای که به کمک آن بتوان درصد اضافه مجاز انقباض خطی یک جسم جامد را برحسب ضریب انبساط خطی متوسط در فاصله حرارتی نقطه ذوب تا درجه حرارت محیط بدست آورد به‌صورت زیر است

$$\%S = \alpha(\theta_m - \theta_i)\times ۱۰۰$$

$\%S$: اضافه مجاز انقباض تئوری

α: ضریب انبساط خطی متوسط

θ_m: نقطه ذوب

θ_i: دمای محیط (برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد)

مثال: ضریب انبساط خطی یک آلیاژ از مس در فاصله دمایی بین ۳۵ درجه سانتی‌گراد تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۷×۱۰^{-۶} است درصد انقباض این آلیاژ را محاسبه نمایید.

$$\theta_1 = ۳۵C \qquad \theta_2 = ۱۸۰C \qquad \alpha = ۱۷\times۱۰^{-۶} \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۱۷$$

$$\%S = \alpha(\theta_m - \theta_i) \times ۱۰۰$$

$$\%S = ۱۷ \times ۱۰^{-۶}(۱۸۰ - ۳۵) \times ۱۰۰ \quad \Rightarrow \quad \%S = \%۰/۲۴۶۵$$

دانستنی‌های معلم

در جدول ۲ـ۲ و ۳ـ۲ کتاب محاسبات فنی تخصصی درصد اضافه مجاز انقباض تئوری و عملی تعدادی از فلزات آورده شده. شاید این سؤال مطرح شود که چرا در یک دامنه این انقباضات داده شده‌اند، مثلاً چدن خاکستری بین ۱/۳ـ۰/۶ در حالت تئوری و در حالت عملی، برای قطعات کوچک تا ۱۰۰ کیلو برابر ۱ـ۰/۷۵ و قطعات متوسط بین ۱۰۰۰ـ۱۰۰ کیلوگرم برابر ۱ـ۰/۵ و قطعات بزرگ و خیلی بزرگ که وزن آنها بیشتر از ۱۰۰۰ کیلو است ۰/۷۵ـ۰/۵ در نظر گرفته شده است، و یک عدد ثابت نیست.

علت آن این است که در هنگام انجماد در اثر رشد دانه‌ها مقداری انقباض می‌تواند در لابلای دانه‌های رشدیافته حذف شوند یا بطور کلی انقباض می‌تواند در طول قطعه ریختگی مستهلک گردد. برای همین برای قطعات کوچک مقدار انقباض بیشتری (حد بالایی) در نظر گرفته می‌شود چون مقدار کمتری از انقباض را می‌تواند مستهلک کند ولی برای قطعات بزرگ مقدار کمتری (حد پایینی) در نظر گرفته می‌شود. زیرا می‌تواند مقدار بیشتری از انقباض را در خود مستهلک نماید.

البته این حد بالایی و پایینی برای قطعاتی است که از یک جنس باشند.

قسمت هشتم درس: محاسبه ابعاد مدل

با معلوم بودن ابعاد قطعه ریختگی و همچنین درصد اضافه مجاز انقباض خطی ($\%S$) به‌سهولت می‌توان ابعاد مدل یا قالب را محاسبه و تعیین کرد. رابطه مربوطه چنین است. (این همان رابطه‌ای است که در رسم مدل و قالب برای بدست آوردن اندازه مدل استفاده می‌شود)

$$a_m = a_c(۱ + \frac{\%S}{۱۰۰})$$

a_m اندازه مدل یا قالب

a_c اندازه قطعه ریختگی

مثال: ضریب انبساط خطی یک نوع آلیاژ برنج بطور متوسط از درجه حرارت محیط $\theta_i = ۲۵C$ تا نقطه ذوب $\theta_m = ۹۰۶C$ برابر است با $\alpha = ۲۰ \times ۱۰^{-۶} \frac{۱}{c}$ مطلوبست

الف) درصد اضافه مجاز انقباض در طراحی مدل برای قطعه‌ای از این آلیاژ

ب) اندازه طول مدل در صورتی که طول قطعه ریختگی ۶۰cm باشد

$\%S = ?$

$\theta_i = ۲۵C \qquad \alpha = ۲۰\times۱۰^{-۶} \quad \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۲$

$\theta_m = ۹۰۶C \qquad a_m = ? \qquad a_c = ۶۰cm$

الف) $\%S = \alpha(\theta_m - \theta_i)\times۱۰۰$

$\%S = ۲۰\times۱۰^{-۶}(۹۰۶-۲۵)\times۱۰۰ \qquad \%S = \%۱/۷۶$

ب) $a_m = a_c(۱+\frac{\%S}{۱۰۰})$

$a_m = ۶۰(۱+\frac{۱/۷۶}{۱۰۰}) \Rightarrow a_m = ۶۱/۰۵۶$

$\Delta L = a_m - a_c \Rightarrow \Delta L = ۶۱/۰۵۶ - ۶۰$

$\Delta L = ۱/۰۵۶cm$

یعنی طول مدل به اندازه ۱/۰۵۶cm باید بزرگتر در نظر گرفته شود تا پس از انجماد طول ۶۰cm اولیه را داشته باشیم.

مثال: حل مسئله ۴ تمرین آخر فصل دوم

$\alpha = ۲۰\times۱۰^{-۶} \Rightarrow ۰/۰۰۰۰۲$

$\theta_m = ۱۰۰۰C \qquad \theta_i = ۲۵C$

$Di_۱ = ۶۰ \qquad Di_۲ = ۲۴۰$

$\%S = ? \qquad D_{m۱} = ? \qquad D_{m۲} = ?$

الف) $\%S = \alpha(\theta_m - \theta_i)\times۱۰۰$

$\%S = ۲۰\times۱۰^{-۶}(۱۰۰۰-۲۵)\times۱۰۰ \Rightarrow \%S = \%۱/۹۵$

ب) $a_m = a_c(۱+\frac{\%S}{۱۰۰})$

برای راحت‌تر حل‌کردن مسئله از آنجایی که عبارت $(۱+\frac{\%S}{۱۰۰})$ عددی ثابت است، می‌توان آنرا بطور مجزا محاسبه کرد و در جای خود برای هریک از قطرها در رابطه قرار داد (اما برای جذب بهتر هنرجویان اگر لازم است محاسبات را تکرار کنید)

$(۱+\frac{\%S}{۱۰۰}) \Rightarrow (۱+\frac{۱/۹۵}{۱۰۰}) \Rightarrow ۱/۰۱۹۵$

$D_m = D_c(۱+\frac{\%S}{۱۰۰})$

$\Rightarrow D_{m۱} = ۶۰(۱/۰۱۹۵) \Rightarrow D_{m۱} = ۶۱/۱۷$ قطر داخلی

$\Rightarrow D_{m۲} = ۲۴۰(۱/۰۱۹۵) \Rightarrow D_{m۲} = ۲۴۴/۶۸$ قطر خارجی

قسمت نهم درس: درصد اضافه مجاز انقباض عملی

محاسبه S% با استفاده از α تئوری محاسبه گردیده است اما در عمل S٪ تئوری با عملی با هم متفاوت می‌باشند زیرا عواملی نظیر چگونگی سرد شدن (نوع انجماد، سرعت انجماد)، ابعاد قالب، پیچیده یا ساده بودن قالب موجب تغییر S% می‌شود. بنابراین باید مقدار تئوری هریک در ضریبی بنام K ضرب شود تا درصد انقباض عملی به دست آید.

$$\%S = K \times \%S$$

درصد اضافه مجاز انقباض عملی= ضریب × درصد اضافه مجاز انقباض تئوری

قسمت دهم درس: تغییرات چگالی نسبت به انبساط و انقباض اجسام

چون افزایش دما باعث انبساط می‌شود بدون تغییر در جرم یا وزن آن، پس چگالی جسم که متناسب با عکس حجم آن است یعنی:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

پس با افزایش حجم چگالی کاهش می‌یابد، یعنی با افزایش درجه حرارت و انبساط اجسام چگالی آنها کاهش می‌یابد.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$V_2 = V_1(1+\gamma\Delta\theta) \Rightarrow$ V با جاگذاری رابطه بالا بجای

$\frac{m}{\rho_2} = \frac{m}{\rho_1}(1+\gamma\Delta\theta) \Rightarrow$ از آنجایی‌که جرم‌ها برابرند

$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1+\gamma\Delta\theta} \Rightarrow$ چنانچه مخرج کسری به صورت بیاید علامت آن تغییر می‌کند

$\rho_2 = \rho_1(1-\gamma\Delta\theta)$

تعاریف مهم فصل دوم

۱ـ ضریب انبساط خطی، سطحی و حجمی را تعریف کنید و رابطه بین آنها را بنویسید. صفحه ۲۶ قسمت ۱ـ۲ و صفحه ۲۸ خط آخر

۲ـ منظور از جسم ایزوتروپ و انیزوتروپ چیست؟ برای هریک مثالی بزنید. صفحه ۲۷ پاراگراف سوم

۳ـ چرا در ساختن وسایل آزمایشگاهی از شیشه کوارتز و پاندول از آلیاژ اینوار استفاده می‌شود؟ صفحه ۲۸ پاراگراف دوم

۴ـ منحنی تغییرات انبساط و انقباض حجمی یک کیلوگرم آب را رسم کنید و توضیح دهیدصفحه ۳۱ پاراگراف اول

۵ـ بطور کلی درصد اضافه مجاز انقباض خطی در ریخته‌گری به چه عواملی بستگی دارد آنها را بنویسید؟ صفحه ۳۴ خط ۹

۶ـ انبساطی که در چدن خاکستری هنگام سرد شدن مطرح است، انبساط چه مرحله‌ای است؟ صفحه ۳۵ خط سوم

۷ـ اگر چگالی یک جسم جامد در درجات حرارت θ_1 و θ_2 به ترتیب برابر ρ_1 و ρ_2 باشد، مقدار چگالی در دمای θ_2 را چگونه می‌توان تعیین کرد، چگونه می‌توان درصد تغییرات حجم آن را تعیین کرد؟ روابط هریک را بنویسید. صفحه ۳۸

قسمت یازدهم درس

امروز با مباحث انبساط آب، انبساط ظاهری و حقیقی مایعات، انقباض دراثر کاهش درجه حرارت، محاسبه درصد اضافه مجاز انقباض، نحوه محاسبه ابعاد مدل، درصد اضافه مجاز انقباض عملی و تغییرات چگالی نسبت به انبساط و انقباض اجسام آشنا شدید.

برای جلسه آینده تمرین‌های آخر فصل دوم را حل نمایید.

حل مسایل باقیمانده آخر فصل و آماده‌کردن هنرجویان برای آزمون جلسه آینده می‌باشد.

هفته هشتم: حل مسائل باقیمانده، رفع اشکالات و آزمون فصل دوم

در ابتدا مسایل باقیمانده آخر فصل حل شده و هنرجویان برای آزمون آماده می‌شوند.

سپس آزمون کلاسی از فصل دوم که در برگه‌های A۴ تهیه شده گرفته می‌شود.

سؤالات تایپ شده و واضح بوده تا هیچگونه سؤالی از طرف هنرجویان نباشد.

نام و نام خانوادگی ...... زمان ۴۰ دقیقه (استفاده از ماشین‌حساب مجاز است)

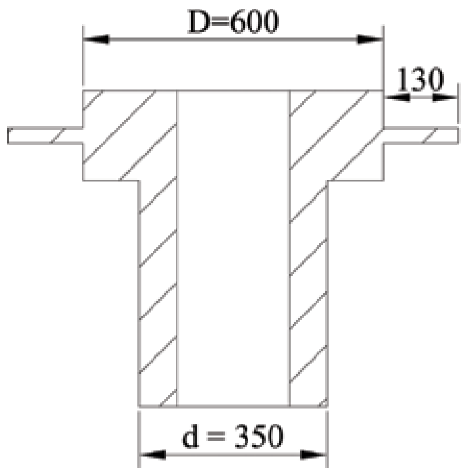
یک قطعه ریختگی از آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم (سیلومین) مطابق شکل زیر مورد نیاز است، در صورتی که ضریب انبساط خطی این آلیاژ بطور متوسط $\alpha = ۲۳\times ۱۰^{-۶}$ و نقطه ذوب آن $۶۴۰^\circ C$ باشد مطلوبست.

الف) درصد اضافه مجاز انقباض خطی آلیاژ از نقطه ذوب تا دمای محیط ($۲۵^\circ C$)

ب) تعیین ابعاد مدل این قطعه (فقط برای اندازه‌های داده شده)

ج) محاسبه و تعیین چگالی قطعه در نقطه ذوب درصورتی که چگالی آن در $۲۵^\circ C$ برابر $۲/۶۵\frac{gr}{cm^۳}$ باشد.

د) درصد کاهش حجم قطعه نسبت به مدل (یا قالب) را بدست آورید.



شکل ۱-۸

در ضمن پاسخ‌گویی به آزمون توسط هنرجویان، فرصت برای حضور و غیاب وجود دارد.

پس از ۵۰ دقیقه برای آزمون کلاسی برگه‌ها برای تصحیح با هنرجوی بغل‌دستی تعویض، و حل مسئله روی تخته با بارم مربوطه نوشته می‌شود.

الف) $\%S = \alpha(\theta_m - \theta_i)\times ۱۰۰$ (۱/۵)

$\%S = ۲۳\times ۱۰^{-۶}(۶۴۰-۲۵)\times ۱۰۰$ (۱)

$\%S = ۱/۴$ (۰/۵)

ب) $۱+\frac{\%S}{۱۰۰} = ۱+\frac{۱/۴}{۱۰۰} = ۱/۰۱۴$ (۰/۵)

$D_۲ = D_۱(۱+\frac{\%S}{۱۰۰})$ (۱/۵)

$D_۲ = ۶۰۰ \times ۱/۰۱۴$ (۱) $D_۲ = ۶۰۸/۴mm$ (۰/۵)

$d_۲ = d_۱(۱ + \frac{\%S}{۱۰۰})$ (۱/۵)

$d_۲ = ۳۵۰ \times ۱/۰۱۴$ (۱) $d_۲ = ۳۵۵$ (۰/۵)

$L_۲ = L_۱(۱ + \alpha\Delta\theta)$ (۱/۵)

$L_۲ = ۱۳۰(۱ + ۲۳ \times ۱۰^{-۶} \times (۶۴۰ - ۲۵))$ (۱) $L_۲ = ۱۳۱/۸۳۸$ (۰/۵)

ج) $\gamma = ۳\alpha \Rightarrow \gamma = ۳ \times ۲۳ \times ۱۰^{-۶}$ (۱) $\gamma = ۶۹ \times ۱۰^{-۶}$ (۰/۵)

$\rho_۲ = \rho_۱(۱ - \gamma\Delta\theta)$ (۱/۵)

$\rho_۲ = ۲/۶۵(۱ - ۶۹ \times ۱۰^{-۶}(۶۴۰ - ۲۵))$ (۱) $\rho_۱ = ۲/۵۴$ (۰/۵)

د/ $\frac{\Delta V}{V_۱} \times ۱۰۰ = (۱ - \frac{\rho_۲}{\rho_۱}) \times ۱۰۰$ (۱/۵)

$\frac{\Delta V}{V_۱} \times ۱۰۰ = (۱ - \frac{۲/۵۴}{۲/۶۵}) \times ۱۰۰$ (۱)

$\frac{\Delta V}{V_۱} \times ۱۰۰ = \%۴/۱۵$ (۰/۵)

پس از تصحیح برگه‌ها توسط هنرجویان نمرات هر هنرجو توسط مصحح آن در دفتر ثبت می‌شود.

برای اینکه تصحیح به درستی انجام شده باشد چند برگه بصورت راندوم بازبینی می‌شود.