



Ursprungsartikel PentronicNytt 2020-2 (utökad artikel fr.sid 3)

Kontaktmotstånd

av professor emeritus Dan Loyd

FRÅGA: I flera teknikartiklar i Pentronic Nytt diskuteras om och när det är lämpligt att använda anliggningsgivare och hur kontaktmotståndet mellan givaren och mätobjektet inverkar på mätfelet. En slutsats verkar vara att ju större kontaktmotstånd man har mellan givaren och mätobjektet desto större mätfel riskerar man att få. Hur kan jag avgöra om kontaktmotståndet är av betydelse och hur skall jag bära mig åt för att minska kontaktmotståndet så att mätfelet blir så litet som möjligt?

Hossein N

SVAR: Frågorna är mycket berättigade och de berör ett område, där det tyvärr är svårt att ge enkla och entydiga svar. Ett stort kontaktmotstånd kan ge ett stort mätfel, men det behöver inte vara så. Anliggningsgivare har många fördelar, men man måste minimera inverkan av kontakt-motståndet för att undvika stora mätfel. Jag börjar med att gå igenom orsakerna till att det uppstår ett kontaktmotstånd mellan två ytor och kommentera några av de faktorer som påverkar kontaktmotståndet. Därefter diskuterar jag hur man kan bedöma inverkan av kontaktmotståndet på mätfelet.

I Figur 1a (sid.2) visas temperaturfördelningen vid en perfekt termisk kontakt mellan två stora plattor, 1 och 2, med yttemperaturen T_1 och T_2 . I verkligheten finns det tyvärr ingen perfekt kontakt, eftersom det inte existerar några helt släta ytor. Alla ytor har en viss ytjämnhet. En kallvalsad plåt har en ytjämnhet på ungefär 1 – 3 μm (1 μm = 0.001 mm) och en svarvad yta kan ha ytjämnheten 0.5 – 12 mm. Det finns därmed ett begränsat antal kontaktpunkter, där de två plattorna har direkt kontakt med varandra – se Figur 1b.

Värmetransporten i kontaktpunkterna sker genom värmeledning. Det finns också små hålrum mellan plattorna. Om det finns luft eller någon annan gas i hålrummen sker värmetransporten mellan de båda plattorna genom dels värmeledning i kontaktpunkterna dels värmeledning i gasen. Vidare kan värmetransporten ske genom strålning mellan ytorna i hålrummen. Om plattorna befinner sig i vacuum sker värmetransporten enbart genom värmeledning i



PENTRONIC

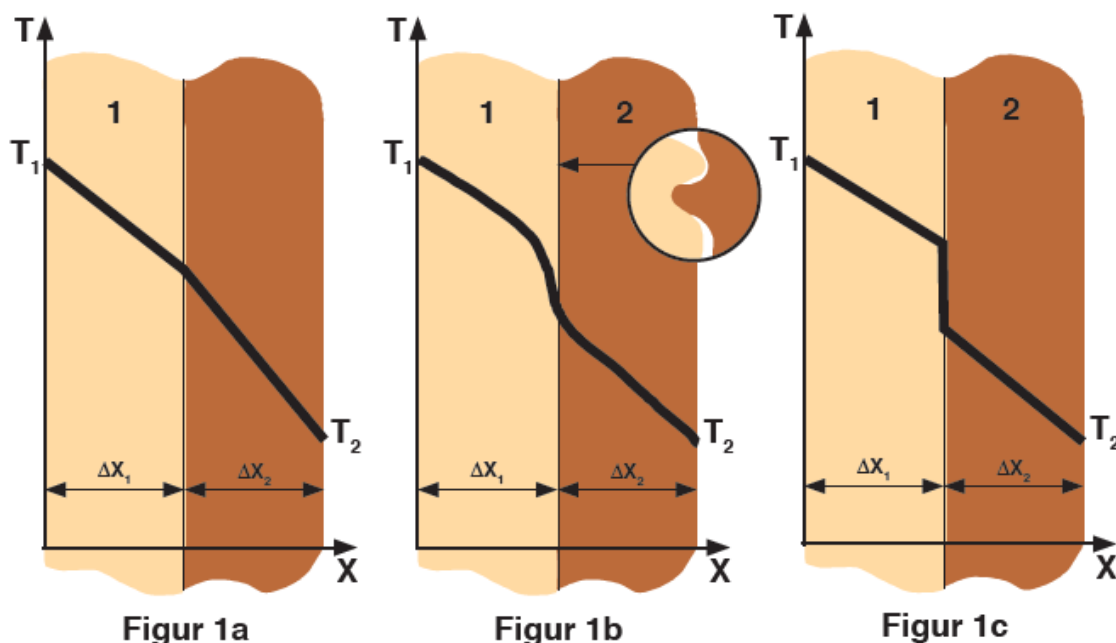
Bergsliden 1, SE-593 96 Västervik, Sweden
Tel. +46 490-25 85 00, Fax. +46 490-237 66
info@pentronic.se, www.pentronic.se

kontaktpunkterna och genom strålning mellan ytorna i hålrumsen. Både värmeledning och strålning är beroende av temperaturen. När det finns ett kontaktnotstånd mellan plattorna får man en temperaturfördelning enligt Figur 1b.

Legerat stål har värmekonduktiviteten 40 – 50 W/(m K), rostfritt stål ungefär 15 W/(m K) och luft vid rumstillstånd 0.03 W/(m K). Allmänt gäller att värmetransporten i hålrumsen är liten jämfört med värmetransporten i kontaktpunkterna. För att förbättra värmetransporten kan man fylla hålrumsen med ett lämpligt material - kontaktpasta - med en värmekonduktivitet, som är högre än den för gas. Om kontaktpastan har värmekonduktiviteten 1 – 2 W/(m K) får man en betydligt bättre värmetransport än i luft.

Värmetransporten påverkas av de båda plattornas värmekonduktivitet och ytjämnhet. Vidare inverkar värmekonduktiviteten hos innehållet i hålrumsen. Trycket mellan de båda plattorna påverkar också kontaktnotståndet, eftersom antalet kontaktpunkter ökar med ökande tryck. Detta innebär att ju högre tryck desto lägre kontaktnotstånd. Om man skulle få korrosion mellan ytorna ökar kontaktnotståndet.

Materialens hårdhet påverkar kontaktpunkternas antal och geometri, vilket i sin tur påverkar värmetransporten och därmed kontaktnotståndet. Två plattor av rostfritt stål har därför högre kontaktnotstånd än två plattor av ett mjukare material såsom aluminium, om förhållandena i övrigt är lika. För att öka värmetransporten och minska kontaktnotståndet skulle man i detta fall kunna belägga det rostfria materialet med något mjukare material såsom en aluminiumlegering.



Utökad artikel:

För den ideala kontakten (inget kontaktmotstånd) mellan de två plattorna i Figur 1a kan man beräkna värmeflödet Q W tvärs plattorna enligt sambandet

$$Q = A U (T_1 - T_2) \quad (1)$$

där, T_1 och T_2 är plattornas yttemperatur i °C, Δx_1 och Δx_2 plattornas tjocklek i m, A värmeöverförande yta i m² och U värmegenomgångskoefficienten i W/(m²K). För U gäller sambandet

$$1/AU = \Delta x_1/(A\lambda_1) + \Delta x_2/(A\lambda_2) \quad (2)$$

där, λ_1 och λ_2 är plattornas värmekonduktivitet i W/(m K). När det finns ett kontaktmotstånd mellan plattorna får man en temperaturfördelning enligt Figur 1b. Kontaktmotståndet gör att värmeflödet tvärs plattorna minskar och temperaturfördelningen ändras.

I Figur 1c visas en modell av temperaturfördelningen, som man kan användas vid beräkningar. Man tar då hänsyn till kontaktmotståndet genom att införa en kontaktkoefficient α_k i W/(m²K). För U gäller nu sambandet

$$1/AU = \Delta x_1/(A\lambda_1) + 1/(A\alpha_k) + \Delta x_2/(A\lambda_2) \quad (3)$$

Sambanden (1) och (3) för värmeflödet tvärs plattorna kan också skrivas

$$(T_1 - T_2) = (\Delta x_1/(A\lambda_1) + 1/(A\alpha_k) + \Delta x_2/(A\lambda_2)) Q \quad (4)$$

Temperaturdifferensen ($T_1 - T_2$) är den "drivkraft" som krävs för värmetransporten tvärs de två plattorna. Storheten $\Delta x_1/(A\lambda_1)$ är det termiska motståndet i platta 1, $1/(A\alpha_k)$ är det termiska kontaktmotståndet och $\Delta x_2/(A\lambda_2)$ är det termiska motståndet i platta 2.

Kontaktkoefficienten, α_k , är tyvärr mycket svår att bestämma. Den beror bland annat av plattornas värmekonduktivitet, hårdhet och ytjämnhet. Vidare inverkar värmeledningen och eventuell strålning i det material som finns mellan plattorna. Värmetransporten genom värmeledning och strålning är beroende av temperaturen. Trycket mellan plattorna och en eventuell ytbeläggning på plattorna är också väsentliga faktorer som påverkar kontaktmotståndet. Det finns olika modeller för att genomföra en numerisk beräkning av kontaktmotstånd, men en kombination av experiment och beräkningar är nödvändig för att man skall nå ett resultat, som kan användas i praktiken. Tyvärr brukar kontaktmotståndet ofta ändras med tiden till följd av exempelvis korrosion och minskning av kontaktrycket.

Genom att jämföra de termiska motstånden kan man uppskatta om det termiska kontaktmotståndet är en väsentlig del av det totala termiska motståndet eller om kontaktmotståndet kan försummas.



Sambandet (4) kan jämföras med Ohms lag tillämpad för tre seriekopplade motstånd i en elektrisk krets

$$V = (R_1 + R_2 + R_3) I \quad (5)$$

där, V är spänningen i Volt över de tre motstånden med resistansen R_1 , R_2 och R_3 Ohm och I strömmen i Ampere genom de tre motstånden.

Temperaturdifferensen ($T_1 - T_2$) mellan plattornas ytor motsvarar spänningen V över motstånden, värmeflödet Q motsvarar strömmen I genom de seriekopplade motstånden och de tre termiska motstånden $\Delta x_1/(A\lambda_1)$, $1/(A\alpha_k)$ och $\Delta x_2/(A\lambda_2)$ motsvarar de elektriska motstånden R_1 , R_2 och R_3 . Det finns emellertid en väsentlig skillnad mellan den elektriska kretsen med de tre motstånden och värmetransporten tvärs plattorna. De elektriska motstånden kan normalt betraktas som konstanta, men det gäller tyvärr inte för de termiska motstånden, som bland annat beror av temperaturen.

Exempel 1

Värmeffödet tvärs två stora plattor av rostfritt stål påverkas av ett kontaktmotstånd mellan plattorna – jämför Figur 1c. Plattorna har tjockleken 6 mm och 3 mm, ytjämnheten 2.5 μm och värmekonduktiviteten 15 W/(m K). Plattornas temperatur är ungefär 100 °C och yttrycket 15 10^5 Pa. Kan man i detta fall försumma inverkan av kontaktmotståndet, när man beräknar värmeffödet tvärs plattorna?

För rostfritt stål med ytjämnheten 2.5 μm , yttrycket 15 10^5 Pa och en materialtemperatur på ungefär 100 °C finner man i en handbok kontaktkoefficienten 3800 W/(m²K). De termiska motstånden kan nu beräknas enligt samband (4) med $A = 1 \text{ m}^2$

$$(T_1 - T_2) = (0.006/15 + 1/3800 + 0.003/15) Q$$

$$(T_1 - T_2) = (0.00040 + 0.00026 + 0.00020) Q$$

Det termiska kontaktmotståndet är i detta fall av samma storleksordning som de termiska motstånden i plattorna. Det betyder i detta fall att man inte kan försumma inverkan av kontaktmotståndet. En möjlighet som man kan använda för att minska kontaktmotståndet är att använda kontaktpasta mellan plattorna.

Exempel 2

För att mäta vattentemperaturen i ett stålrör med innerdiametern 250 mm och väggjockleken 5 mm använder man en anliggningsgivare utanpå röret. Vattentemperaturen är ungefär 90 °C, trycket 1 MPa och flödet ungefär 350 m³/h. Röret är isolerat med 80 mm mineralull och det befinner sig i en verkstadslokal, vars temperatur är cirka 15 °C.

Mellan röret och givaren finns alltid ett kontaktmotstånd. Om man skall uppskatta inverkan av kontaktmotståndet på den uppmätta temperaturen räcker det inte med att såsom i Exempel 1



PENTRONIC

Bergsliden 1, SE-593 96 Västervik, Sweden
Tel. +46 490-25 85 00, Fax. +46 490-237 66
info@pentronic.se, www.pentronic.se

ovan jämföra kontaktmotståndet med de termiska motstånden i röret och givaren. I detta fall måste man jämföra kontaktmotståndet med alla termiska motstånd som finns för värmeflödet mellan vattnet i röret och luften i verkstadslokalen. Man måste då även inkludera det termiska motståndet mellan vätskan och rörväggen, motståndet i isoleringen och motståndet mellan isoleringens utsida och luften i verkstadslokalen.

Problemet är tre-dimensionellt, men man får ett acceptabelt resultat om man betraktar problemet som en-dimensionellt. Vattenflödet 350 m³/h motsvarar medelhastigheten 2.0 m/s och värmeövergångskoefficienten kan uppskattas till 8000 W/(m²K). Stålröret har värmekonduktiviteten 48 W/(m K) och anliggningsgivaren är innesluten i en aluminiumkropp med tjockleken 4 mm och värmekonduktiviteten 160 W/(m K). Kontaktkoefficienten antas vara 7600 W/(m²K). Mineralull har värmekonduktiviteten 0.040 W/(m K) och värmeövergångskoefficienten på isoleringens utsida kan uppskattas till 10 W/(m²K). Man tar då hänsyn till både egenkonvektion och strålning. De termiska motstånden kan nu beräknas på samma sätt som i Exempel 1

$$(T_1 - T_2) = (1/8000 + 0.005/48 + 1/7600 + 0.004/160 + 0.076/0.40 + 1/10) Q$$

$$(T_1 - T_2) = (0.00013 + 0.00010 + 0.00013 + 0.00003 + 1.90000 + 0.10000) Q$$

Kontaktmotståndet är av samma storleksordning som de termiska motstånden på rörets insida och i materialen på båda sidor om kontaktytan. Dessa fyra termiska motstånd är emellertid försumbara jämfört med de termiska motstånden i isoleringen och på isoleringens utsida. Temperaturdifferensen mellan vattentemperaturen och den temperatur som givaren mäter är mindre än 0.05 °C. I detta fall har kontaktmotståndet ingen betydelse.

Om kontaktmotståndet skulle öka på grund av exempelvis korrosion och minskning av kontaktrycket så ökar mätfelet. Med kontaktkoefficienten 150 W/(m²K) blir mätfelet ungefär 0.3 °C. I detta fall är inte kontaktmotståndet försumbart. Om mätfelet är acceptabelt eller inte måste som vanligt bedömas från fall till fall.

Några råd för att minska mätfelet vid anliggningsgivare

Om man använder anliggningsgivare för att till exempel mäta vätsketemperaturen i ett rör är det nödvändigt att regelbundet kontrollera installationen. För att minimera mätfelet skall alltid röret med givaren vara mycket väl isolerat och man bör även använda kontaktpasta mellan givaren och mätobjektet. Vid kontroll eller utbyte av givaren är det därför viktigt att man kontrollerar att isoleringen återställs. Det är också nödvändigt att kontrollera att det finns kontaktpasta och att man har ett högt anliggningsstryck mellan givaren och röret. Om det skulle uppstå ett oxidskikt mellan röret och givaren resulterar detta i att mätfel ökar. Om det skulle uppstå ett glapp är det förödande för mätnoggrannheten.

Förutom kontaktmotståndet finns alltid de "normala" faktorerna som påverkar mätfelet. Om det skulle uppstå en beläggning på rörväggen inne i röret påverkas värmeflödet till omgivningen och därmed den temperatur som givaren mäter. Om isoleringen skulle bli blöt påverkas värmeflödet till omgivningen och därmed den temperatur som givaren mäter – mätfelet ökar.



PENTRONIC

Bergsliden 1, SE-593 96 Västervik, Sweden
Tel. +46 490-25 85 00, Fax. +46 490-237 66
info@pentronic.se, www.pentronic.se

Tyvärr är värdet på kontaktkoefficienten mycket osäkert. Med samma förutsättningar ger ofta två handböcker olika värden på kontaktkoefficienten. Båda värdena är förmodligen rätt, men de har tagits fram under de angivna förutsättningarna plus ytterligare några förutsättningar. Vilka dessa ytterligare förutsättningar är framgår tyvärr inte av handböckerna. Tänk på att kontaktkoefficienten är mycket svår att bestämma – använd därför alltid flera källor för att bestämma värdet på kontaktkoefficienten.

