

3. Dati tecnici

Dati tecnici dei cilindri di attrito (indicazioni approssimative):

Diametro D : 48 mm

Altezza: 50 mm

Cilindro di alluminio: peso $m_A = 250$ g, capacità termica specifica $c_A = 0,86$ kJ/kg K,

Cilindro di rame: $m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K

Collegamento elettrico: jack con diametro di 2 mm, polo positivo „+“ isolato, Polo negativo „-“ sul peso, l'inversione di polarità non comporta alcuna distruzione.

4. Uso

- L'apparecchio per l'equivalente termico viene fissato con il morsetto da tavolo su un piano di lavoro stabile. Successivamente la corda d'attrito, come mostrato in fig. 1, viene avvolta intorno al cilindro di attrito per 4,5 - 5,5 volte: in tal modo il contrappeso dovrebbe pendere verso il basso dal dietro e l'estremità libera della corda dal davanti.
- Come peso può essere utilizzato il secchio fornito in dotazione, dopo essere stato riempito con acqua, sabbia, ecc. (peso totale circa 5 kg). L'estremità libera della corda d'attrito viene legata al peso che si trova sul pavimento; fare attenzione che, in caso di corda tesa, il contrappeso ha una distanza di soli 5 cm circa dal pavimento. In tal modo durante l'esperimento risulta impossibile sollevare il peso di oltre 10 cm circa.
- Se ora azionando la manovella si nota che la corda scorre verso destra e, se necessario, non rimane nell'incavo, la corda viene avvolta intorno al cilindro di attrito in modo che l'estremità della stessa a cui è attaccato il peso si trovi a destra e l'estremità con il contrappeso a sinistra.
- Il sensore di temperatura viene inumidito con una goccia di olio (importante!) e inserito nel cilindro di attrito selezionato, come da fig. 1, fino a scattare in sede in modo percettibile e può essere ruotato facilmente (se viene inserito eccessivamente o insufficientemente, non ruota liberamente). I due attacchi del sensore di temperatura vengono collegati a un ohmmetro (multimetro), che nel range compreso tra 2 k Ω e 9 k Ω deve essere dotato di almeno un display a 3 cifre. La resistenza misurata può essere

convertita in temperatura sia utilizzando la tabella presente sull'ultima pagina di queste istruzioni che con l'ausilio della seguente equazione:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

dove R deve essere inserito in k Ω , per ottenere T in $^{\circ}\text{C}$. Questa equazione ha una corrispondenza di $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ con le indicazioni della tabella del costruttore della resistenza NTC nel range compreso tra 10 e 40°C .

- Prima di eseguire un esperimento il cilindro di attrito circa 5 - 10°C a temperatura ambiente. A tale scopo può essere collocato in un frigorifero o in acqua fredda: il foro del sensore di temperatura deve essere rivolto verso l'altro e la profondità di immersione può essere pari solamente ai 2/3 circa dell'altezza del cilindro (consiglio: se il cilindro di attrito viene posto in acqua dopo essere stato inserito in una busta di plastica, dopo il raffreddamento non è necessario asciugarlo).
- L'incremento della temperatura durante un esperimento dovrebbe proseguire fino a che la temperatura del cilindro di attrito supera di circa 5 - 10°C la temperatura ambiente. Tanto maggiore è la corrispondenza tra le differenze di temperatura (ciascuna rispetto alla temperatura ambiente) durante il raffreddamento e il riscaldamento, quanto inferiore è lo scambio termico netto con l'ambiente.
- Per il riscaldamento elettrico dei cilindri di attrito vengono forniti cavi adattatori, che su un lato sono dotati di connettori con diametro di 2 mm e sull'altro lato di comuni connettori da laboratorio con diametro di 4 mm. Per l'alimentazione elettrica dovrebbe essere utilizzato un alternatore con limitazione di tensione e di corrente regolabile, per cui non deve essere superata la tensione max. dell'alternatore pari a 40 V. Il polo positivo dell'alimentatore viene collegato al jack isolato (sulla piastrina rotonda grigia di plastica presente sotto il jack) e il polo negativo con l'altro jack.
 - Gli elementi termici sui cilindri di attrito si comportano indicativamente come resistenze ohmiche da circa 11 Ω . La capacità di carico massima è pari a 36 W, con max. 20 V e una corrente regolabile di circa 1,8 A. Per impostare un punto d'esercizio si consiglia di impostare la limitazione di corrente esattamente a 1 A e la limitazione della tensione a circa 15 V. Queste impostazioni ora non vengono più modificate; fino all'esperimento la corrente viene interrotta semplicemente estraendo i cavi.

5. Manutenzione

- L'apparecchio per l'equivalente termico in linea di principio non richiede manutenzione. Per quanto riguarda la pulizia, può essere pulito a umido (acqua con detergente). Non impiegare solventi. Evitare di immergere l'apparecchio in acqua.
- I cilindri di attrito devono essere in metallo lucido. Se si dovesse essere formato uno rivestimento, è possibile rimuoverlo con un detergente per metalli.
- La corda di attrito può eventualmente essere lavata. Come corda sostitutiva economica può essere impiegata una fune di poliammide intrecciata (ad es. Per il mecatro dell'edilizia).

6. Esecuzione dell'esperimento e analisi

6.1 Trasformazione di lavoro meccanico in calore

6.1.1 Esecuzione dell'esperimento

- Innanzitutto vengono stabiliti i diversi pesi: peso principale (ad es. secchio con acqua)
 $m_H = 5,22 \text{ kg}$
contrappeso (sulla corda di attrito)
 $m_G = 0,019 \text{ kg}$
cilindro di alluminio $m_A = 0,249 \text{ kg}$
- Ulteriori grandezze che devono essere misurate in precedenza:
temperatura ambiente $T_U = 23,2^\circ\text{C}$
diametro del cilindro sulla superficie di attrito $D_R = 45,75 \text{ mm}$
- Dopo il raffreddamento del cilindro di attrito, quest'ultimo viene avvitato al supporto, viene inserito il sensore di temperatura e viene avvolta la corda di attrito intorno al cilindro (cfr. paragrafo 4). Dopo alcuni minuti, che dovrebbero permettere una distribuzione omogenea della temperatura, la resistenza del sensore di temperatura è pari a $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (corrispondenti a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ in base all'equazione 1).
- Dopo avere verificato l'azzeramento del contactore viene avviato l'esperimento, ruotando la manovella dal pavimento. Ora il contrappeso si abbassa sul pavimento e in tal modo viene leggermente tolto tensionamento alla corda di attrito e viene prodotto meno attrito sul cilindro. Il peso principale mantiene ora la sua altezza, che dovrebbe rimanere la stessa durante tutto l'esperimento.
- Dopo $n = 460$ giri l'esperimento viene terminato e viene letto il valore della resistenza: $R_2 = 3,99 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).

- Poiché la temperatura aumenta ancora per poco, subito dopo la fine dell'esperimento (omogeneizzazione della distribuzione della temperatura), viene annotato come valore misurato il valore minimo della resistenza, che viene raggiunto pochi secondi dopo la fine dell'esperimento. Dopo di che la resistenza torna ad aumentare, poiché in seguito allo scambio di calore con l'ambiente scende la temperatura del cilindro.

6.1.2 Analisi dell'esperimento

Il lavoro W è definito come il prodotto della forza F e del percorso s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

In caso di attrito agisce la forza

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g è l'accelerazione terrestre) lungo il percorso

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- Inserendo le equazioni 3 e 4 nella 2 si ottiene:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

Il calore immagazzinato nel cilindro di attrito ΔQ si ottiene dalla differenza di temperatura ($T_2 - T_1$) e della capacità termica specifica indicata nel paragrafo 3:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ KJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

In questo esempio la deviazione tra il lavoro meccanico e il calore è pari solamente a circa l'1%. A causa di tolleranze inevitabili presenti nella composizione del materiale (l'alluminio puro è estremamente morbido ed è difficilmente lavorabile meccanicamente, pertanto utilizzare sempre leghe) la capacità termica specifica può tuttavia oscillare notevolmente. Deve essere determinata singolarmente per ogni cilindro di attrito. Ciò può essere eseguito nel modo più semplice mediante il riscaldamento elettrico e presupponendo l'equivalenza tra valore ed energia elettrica.

6.2 Conversione dell'energia elettrica in calore

6.2.1 Esecuzione dell'esperimento

- Dopo il raffreddamento del cilindro di attrito, quest'ultimo viene avvitato al supporto (stesse condizioni dell'esperimento relativo all'attrito) e viene inserito il sensore di temperatura. Dopo alcuni minuti, che dovrebbero permettere una distribuzione omogenea della temperatura, la resistenza del sensore di temperatura è pari a $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (corrispondenti a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ in base all'equazione 1).

- Ora l'alimentatore precedentemente impostato (ved. paragrafo 4) viene collegato all'elemento termico e viene avviato un cronometro. Annotare tensione e corrente (display sull'alternatore):
 $U = 11,4 \text{ V}; I = 1,0 \text{ A}$
- Dopo $t = 300 \text{ s}$ l'esperimento viene terminato e viene letto il valore della resistenza:
 $R_2 = 3,98 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,32^\circ\text{C}$)
Viene inoltre rilevata la (lieve) variazione di tensione: $U = 11,0 \text{ V}$.

6.2.2 Analisi dell'esperimento

L'energia elettrica E è il prodotto ottenuto dalla potenza P e dal tempo t . A sua volta la potenza è il prodotto derivante da tensione e corrente. Pertanto vale (calcolo con tensione media):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

In questo esperimento il calore alimentato è pari a

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

Anche in questo caso la corrispondenza tra E e ΔQ è ottima.

Correlazione tra resistenza e temperatura nel sensore di temperatura

R / kΩ	T / °C								
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11
7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35
7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71
7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83