

## **Appendice**

## COLPO D'ARIE

Se si arresta bruscamente la corrente liquida di un condotto, per esempio con la chiusura repentina di una valvola, si produce contro la parete del tubo un urto violento del fluido detto “colpo d’ ariete” a ricordo degli strumenti chiamati “arieti” che gli antichi guerrieri adoperavano per sfondare le porte delle fortezze assediate. Tale urto dipende dal brusco arrestarsi della corrente, giacche tutta l’energia da esso posseduta viene ad un tratto ad annullarsi nella parete del tubo. L’entità del colpo d’ariete dipende inoltre dalla rapidità della chiusura dell’otturatore e dalla velocità che il liquido aveva in condotta. Quando tale chiusura è repentina la sovrappressione o colpo d’ariete può anche raddoppiare la pressione che esiste in condotta. Il valore del colpo d’ariete si può determinare mediante l’espressione che segue:

Sia  $E$  il modulo di elasticità del fluido

Sia  $E$  duello del metallo della condotta

$s$  lo spessore del tubo

$D$  il diametro del tubo

$\rho$  la densità del fluido

Con la chiusura brusca della condotta la sovrappressione raggiunge in metri di colonna d'acqua

$$c = \frac{\frac{cv_0}{g}}{\sqrt{1 + 0.01 \frac{D}{s}}}$$

## CORROSIONE DA VANADIO

La corrosione da vanadio è pericolosa specialmente nella turbina a gas. Il rendimento termodinamico di una turbina a gas aumenta all'aumentare della  $T_3$  ma nella misura in cui aumenta la temperatura massima del ciclo Joule ecco che andiamo incontro a due fenomeni che non permettono di oltrepassare determinati valori: la corrosione da vanadio e lo scorrimento a caldo. Prendiamo in esame le palette delle turbine a gas; esse sono investite dalla corrente dei fumi. La resistenza di un materiale all'aggressione di agenti esterni è dovuta alla presenza di strati di ossido che si formano sulla superficie. Lo strato di ossido cede all'aumentare di  $T_3$ . Se nel combustibile abbiamo vanadio esso si ossida e forma la vanadina che fonde a  $690^{\circ}\text{C}$ , essa diventando liquida investe le palette. La vanadina, in presenza di ossidi, reagisce immediatamente senza prodotti intermedi. L'ossido presente sulla superficie delle palette reagendo con un altro ossido forma composti binari. La vanadina liquida reagisce con gli strati di ossido del materiale per dare dei composti i quali fondono a  $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ . Non si devono superare le temperature di fusione di questi composti binari. Le palette essendo formate da leghe o superleghe di nichel, molibdeno, cromo o cobalto si formano ossidi di nichel e di ferro che funzionano da elementi protettivi della palette fino a quando l'ossido è compatto. Per esempio il pirovanadiato di nichel fonde, a temperature superiori a  $900^{\circ}\text{C}$ , la vanadina arrivando liquida, trasportata dai gas di combustione, attacca l'ossido superficiale, forma il composto che fonde. Tutto lo strato di ossido viene mangiato. La vanadina arriva liquida (fonde a  $690^{\circ}\text{C}$ , una temperatura più bassa della temperatura di combustione). Non posso superare la temperatura di fusione dei composti binari. Terminato tutto lo strato di ossido la vanadina trova o il nichel o il cromo puro, cede ossigeno ossidando e la vanadina si riduce. Si ha la formazione di ossido di nichel mentre l'ossido di vanadio che si è ridotto, in quanto ha ceduto ossigeno, ritorna in superficie, ritrova l'ossigeno dell'eccesso d'aria e si riforma la vanadina (che si rituffa e riattacca il nichel). L'ossido di nichel che si è formato reagisce con la vanadina determinando la formazione del sale che per la temperatura esistente si trova allo stato liquido. La vanadina è un elemento catalizzatore.

## ESEMPI DI CALCOLO DEL N.P.S.H.

### ESEMPIO 1

In un circuito sperimentale in condizioni di cavitazione incipiente, è stata misurata all' aspirazione di una pompa centrifuga la pressione di 0,42 bar (42000 N/m<sup>2</sup>) con acqua a 20°C.

Il diametro del condotto di aspirazione ove è stata rilevata la pressione è D<sub>0</sub>=0.11m e la portata è di Q=0.4m<sup>3</sup>/s

La velocità nel condotto risulta :

$$c_0 = \frac{4Q}{\pi \cdot D_0} = 4.21 \frac{m}{s}$$

$$\text{Per cui l' (N : P : S : H.)}_a = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + \frac{c_0^2}{2g} = \frac{42000 - 2337}{9.8 \cdot 998.2} + \frac{4.21^2}{19.6} = 4.95m$$

### ESEMPIO II

L' (N.P.N.S.H) di una pompa centrifuga è 3.5m .

Trovare l' altezza di aspirazione se la perdita di carico nel condotto di adduzione è h<sub>ro</sub>=0.8m e la temperatura dell' acqua T=20°C.

La pressione atmosferica sul serbatoio di alimentazione sia p<sub>o</sub>=1.013 bar

In condizioni critiche l' (N.P.S.H.) richiesto e quello disponibile sono uguali per cui :

$$(N.P.S.H)_a = 3.5 = \frac{p_B}{\rho \cdot g} - \frac{p_v}{\rho \cdot g} - z_0 - h_{r0} = \frac{101300 - 42.42}{9.8 \cdot 996} - z_0 - 0.8 = 9.15 - z_0 \Rightarrow z_0 = 5.65m$$

## INTERREFRIGERAZIONE

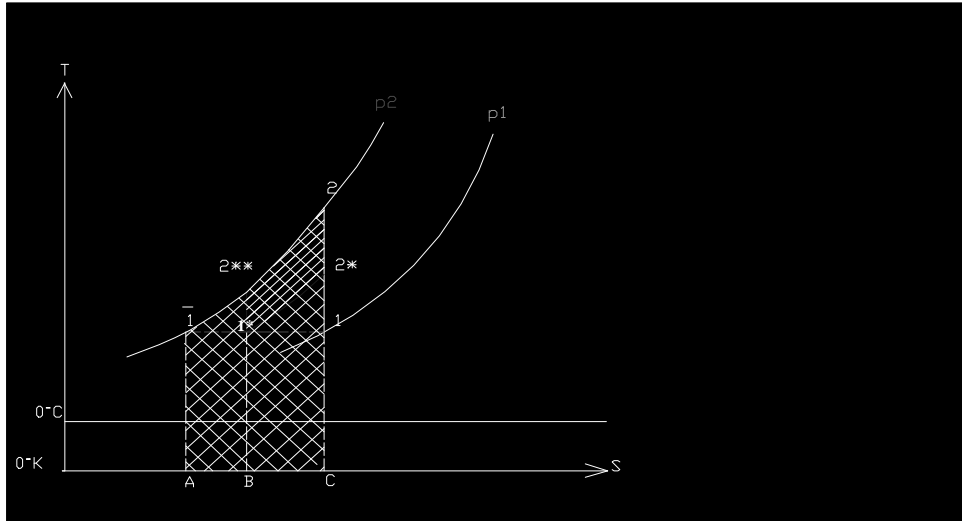
Quando abbiamo studiato i processi di compressione ed espansione di un gas ci siamo soffermati sul rendimento adiabatico mentre non abbiamo parlato di un altro parametro molto importante che si chiama “rendimento isoterma” per il quale la trasformazione reversibile di riferimento è una isoterma e non una adiabatca. Il fatto è che quando il rapporto di compressione è limitato non ci sono esigenze di refrigerare il gas ma quando il valore di  $\beta$  diventa elevato nasce l’esigenza di una refrigerazione intermedia del fluido e della macchina. Prendiamo per esempio l’aria per la quale.

$$k = \frac{c_p}{c_v} = 1.4 \quad e = \frac{k-1}{k} \cong 0.286$$

Con un processo di compressione adiabatico isoentropico se vogliamo valutare la temperatura di fine compressione  $T_2$  abbiamo che con  $\beta=10$  e  $T_1=27^\circ\text{C}$  (impianto a gas) la temperatura di fine compressione è di  $306^\circ\text{C}$ , in questo caso non abbiamo bisogno di interrefrigerare. Vediamo però che cosa succede al aumentare del rapporto manometrico di compressione:

$T_2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\beta$
433	20
645	50
847	100
1092	200

Determinati processi industriali di sintesi richiedono rapporti di compressione dell’ordine di 300-400 . In questi casi se si effettuasse una adiabatca senza interrefrigerare non solo si spenderebbe un lavoro di compressione più elevato ma soprattutto si procurerebbe alla macchina una fine rapida. E’ infatti necessario che le superfici metalliche della macchina siano il meno possibile soggette ad un cimento termomeccanico di fatica termica. La maggior parte delle macchine è lubrificata ma l’olio utilizzato allo scopo ha una legge della viscosità dipendente dalla temperatura, per temperature elevate viene quindi meno la stabilità dell’olio. Per salvaguardare quindi sia la macchina e l’olio lubrificante adibito alla refrigerazione la temperatura di fine compressione deve essere diminuita sottoponendo il gas ad una compressione ed espansione isobara. Interrefrigerare il gas quando abbiamo rapporti di compressione elevati è per così dire obbligatorio anche per un altro motivo, quello del risparmio energetico che ora andremo a studiare. Notate bene: si parla di interrefrigerazione intermedia solo quando  $\beta$  è elevato. Un compressore assiale è raramente interessato da tale processo in quando viene utilizzato per portate elevate ma con rapporti manometrici  $\beta$  dell’ordine di 10 (fa eccezione il doppio ciclo Joule). L’interrefrigerazione intermedia interessa quindi tutti i compressori sia centrifughi che alternativi. Facciamo ora riferimento come al solito al piano T-S ove in sede limite (ma anche in sede reale) le isobare sono tutte curve congruenti tra di loro per traslazione ( $c_p, c_v$ , dipendono solo dalla temperatura). Con riferimento alla figura, per una compressione adiabatca che porti il fluido dallo stato 1 allo stato 2 il lavoro (adiabatco) speso è pari al calore fornito lungo una isobara per scaldare il gas da una temperatura  $T_1$  fino alla  $T_2$  (per l’esposizione completa si rimanda ai richiami di termodinamica riguardanti le turbine a gas).



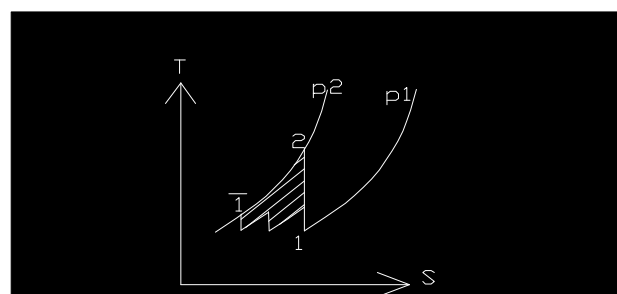
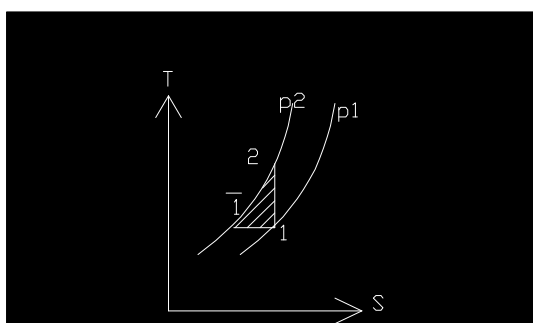
In figura il lavoro di compressione adiabatica è rappresentata dall'area  $\bar{A}12C$

Eseguiamo ora la stessa compressione adiabatica reversibile facendo questa volta una refrigerazione intermedia fino a fare tornare il fluido alla  $T_1$  (punto  $1^*$ ) (in sede limite questo si può fare ma in sede reale no a meno che non si usi un fluido refrigerante ad una temperatura inferiore a quella ambiente). Ricomprimiamo il gas sempre adiabaticamente isoentropicamente fino al punto  $2^{**}$ . Come si può vedere in figura il lavoro speso questa volta è inferiore! Abbiamo in sostanza risparmiato un lavoro meccanico pari all'area  $1^*2^{**}2^*$ .

L'area  $\bar{A}12^{**}C$  rappresenta il lavoro speso per la compressione senza refrigerazione intermedia, mentre l'area

$$\sum [(A\bar{1}2^{**}C) + (B1^*2^*C)]$$

è rappresentativa del lavoro speso comprimendo il gas con una refrigerazione intermedia. L'area  $1^*2^{**}2^*$ , differenza delle due, rappresenta il lavoro risparmiato. In sostanza con una refrigerazione intermedia otteniamo il fluido alla stessa pressione  $p_2$  ma a temperatura più bassa.



Nella misura in cui aumentiamo il numero delle compressioni interrefrigerazioni aumenta anche il risparmio energetico.

Al limite il processo diventerà isoterma. Per i compressori sia centrifughi che alternativi ha più significato concreto definire un rendimento isoterma piuttosto che adiabatico.

$$\mathbf{h}_T = \frac{(L_T)_{rev}}{L_{reale}} \quad \mathbf{h}_{ad} : \text{rendimento adiabatico} \quad \mathbf{h}_T : \text{rendimento isoterma}$$

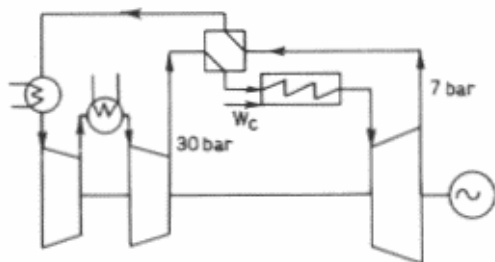
$$(L_T)_{rev} = RT_1 \ln \mathbf{b} \quad L_{reale} = \sum L_{ad \text{ reali}} = \sum_j L_{rj} = \sum_j \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_i}{r_i} \right)_j \left[ \mathbf{b}^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

poiché m può variare con l'indice j è meglio scrivere:

$$L_r = \frac{\sum_j \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_i}{r_i} \right)_j \left[ \mathbf{b}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{\mathbf{h}_j}$$

$\mathbf{h}_j$  : rendimento  $j^{\text{mo}}$  adiabatico di compressione

## IMPIANTO A GAS A CIRCUITO CHIUSO A CIBUSTIONE ESTERNA



Per ridurre le dimensioni del macchinario si adottano livelli di pressione maggiori di quelle di un corrispondente impianto a circuito aperto. Nella figura ad esempio il fluido esce dalla turbina a 7 bar per venire poi compresso a 30 bar. Gli impianti a ciclo chiuso consentono tra l'altro di impiegare come fluido operativo gas diverso dall'aria.

Come dimostra la formula trovata la potenza per unità di portata del fluido aumenta con l'aumentare del calore specifico ; così ad esempio con l'idrogeno si avrebbe una potenza specifica 14 volte circa più grande di quella che si avrebbe con l'aria. Adoperando invece un gas ad elevato peso molecolare, come l'argo, il cripto, lo xeno, si può ridurre notevolmente il numero per gli stadi sia della turbina che del compressore. Rispetto all'aria ad esempio, a parità di altre condizioni il cripto richiederebbe un numero di stadi 3 volte inferiore. D'altra parte le dimensioni radiali delle macchine aumentano anche se di poco, con l'aumentare del peso molecolare principalmente perché aumenta la portata massica di fluido che è necessaria per generare 1 KW di potenza. L'inconveniente maggiore però deriva dal fatto che i gas con peso molecolare elevato hanno un valore basso per il coefficiente di conducibilità termica  $\lambda$  e richiedono pertanto una superficie elevata per lo scambiatore rigenerativo. Con il cripto la superficie di scambio termico risulta 3 volte più grande di quella che sarebbe necessaria se si impiegasse aria come fluido operativo.

TABELLA N. 1  
Proprietà di alcuni gas a 1 atm e a 25°C

	peso molecolare	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (j/kg K)	$k$ ( $c_p/c_v$ )	$R$ (j/kg K)	$\lambda$ (Watt/cm K)
Idrogeno, H	2,016	0,082	14299,376	1,410	4157,975	18,4 $10^{-4}$
Elio, He	4,003	0,169	5232,500	1,660	2008,392	14,9 $10^{-4}$
Neon, Ne	20,183	0,846	1029,756	1,640	401,856	4,92 $10^{-4}$
Aria	28,967	1,184	1006,000	1,400	287,143	2,60 $10^{-4}$
Argo, A	39,948	1,623	523,25	1,668	209,551	1,77 $10^{-4}$
Cripto, Kr	83,80	3,410	246,974	1,680	99,966	0,94 $10^{-4}$
Xeno, Xe	131,30	5,060	167,44	1,670	67,177	0,56 $10^{-4}$

(Handbook of tables for applied engineering science. Chem. Rubber Co. 1970).



## LO SCORRIMENTO VISCOSO

E' noto che una provetta di materiale metallico sottoposta a temperatura ambiente ad un carico di trazione nei limiti del carico di deformazione elastica, dopo un allungamento che si sviluppa dopo l' applicazione della sollecitazione , mantiene una lunghezza invariata anche se il carico si protrae nel tempo.

Analogo comportamento presentano i diversi materiali metallici normalmente utilizzati nelle costruzioni meccaniche e non presenta particolare difficoltà la preparazione di leghe di simile comportamento anche se sottoposte a temperature di qualche centinaio di gradi Celsius.

Si riscontra tuttavia che per un dato materiale esiste tuttavia una temperatura al di sopra della quale il prolungarsi nel tempo di un carico anche limitato non soltanto provoca una deformazione plastica iniziale, ma comporta un continuo allungamento che inevitabilmente porta dopo un certo periodo alla rottura della provetta .Il fenomeno detto scorrimento viscoso a caldo o creep è rappresentato qualitativamente in figura che riporta in funzione del tempo gli allungamenti relativi a carico costante per lo stesso materiale al variare della temperatura: si nota come all' aumentare di questa , la velocità di deformazione aumenta, mentre si riduce il tempo che porta alla rottura , segnalata dal brusco allungamento , dopo un periodo relativamente lungo caratterizzato da una velocità di deformazione pressoché costante .

Il fenomeno del creep viene quindi suddiviso in tre fasi .

Nella prima fase (creep primario ) la velocità di deformazione inizialmente molto alta , diminuisce nel tempo, come avviene in qualsiasi deformazione plastica di un materiale . Se in questo primo periodo la sollecitazione viene meno , una parte della deformazione viene recuperata in misura tanto maggiore quando più alta risultava la sollecitazione e la durata della fase primaria . se la temperatura non è elevata la deformazione si arresta e la curva relativa assume un andamento parallelo all' asse dei tempi.

Se al contrario la temperatura o la sollecitazione supera un certo valore condizionato dalla natura del materiale subentrerà la seconda fase, o creep secondario, durante la quale si ha un equilibrio tra la velocità d' incrudimento e la velocità d' assetto delle dislocazioni, ne segue una velocità di deformazione costante nel tempo. Questa velocità ( velocità minima del creep ), che provoca un allungamento proporzionale al tempo , se risulta molto bassa consente una durata notevole di questa fase .

Ma dopo un tempo più o meno lungo che dipende dalla sollecitazione applicata e dalla temperatura, fenomeni di precipitazione e ricristallizzazione , formazioni di cricche e di fratture locali provocano un forte aumento della velocità di deformazione che è caratteristica della terza fase o creep terziario , il materiale giunge rapidamente a rottura .

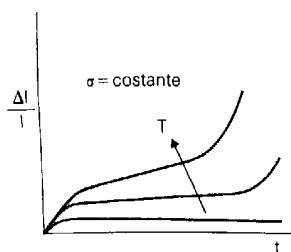
Lo scorrimento viscoso a caldo è controllato da fenomeni interni del materiale che si attivano soltanto a temperature sensibilmente diverse da quella ambiente .

Alle temperature massime di funzionamento di una turbogas, tutti i materiali metallici utilizzati per la costruzione della parti mobili della turbina operano in regime plastico: di conseguenza si è costretti assumere come parametro di riferimento per un buon funzionamento della macchina il valore dell' allungamento massimo compatibile con un buon funzionamento .

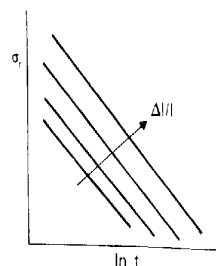
Da diagrammi di tipo riportato nella prima figura , per un prefissato valore dell' allungamento relativo  $\Delta l/l$  corrispondente al massimo allungamento accettabile, si possono tracciare diagrammi del tipo riportato nella seconda figura che permettono di correlare i carichi unitari e le temperature corrispondenti per una determinata durata della sollecitazione.

Fin dalle prime realizzazioni dei turbomotori furono messe appunto super leghe resistenti al cimento termomeccanico e nei decenni successivi i progressi della metallurgia permisero di disporre di materiali di caratteristiche sempre più elevate: tuttavia soltanto i progressi nei sistemi di raffreddamento delle palettature hanno consentito di operare con macchine a

temperature maggiori dei 1000°C



Andamento dell'allungamento nello scorrimento a caldo.



Andamento dei carichi unitari in funzione della temperatura

### Temperatura di ingresso in turbina

Le relazioni che abbiamo mostrato che, se gli altri parametri sono tenuti costanti, la potenza e il rendimento, come del resto in tutti i cicli termici, aumentano con l'aumentare della temperatura massima del ciclo, ovvero del rapporto  $T_3/T_1$ .

Le temperature più elevate si ottengono con miscele combustibili aventi rapporto di dosatura uguale allo stechiometrico. Esse però non possono essere sopportate con continuità dai materiali con i quali sono costruiti gli elementi della turbina e dei combustori. Si dovranno perciò impiegare eccessi d'aria sufficienti ad abbassare la temperatura del fluido fino ai valori ammissibili per il funzionamento degli organi sottoposti a flusso termico.

E' noto che, sollecitati da carichi costanti a temperature superiori ai 400°C, i materiali si deformano in misura crescente con il tempo (scorrimento viscoso). La velocità di scorrimento aumenta con l'aumentare della temperatura e delle tensioni agenti.

Nelle turbine a gas, e in quelle a vapore, le deformazioni delle palette e dei dischi devono essere contenute entro i limiti assai ristretti dei giochi costruttivi, per tutta la durata in esercizio della macchina; la quale giunge fino alle 60.000 - 100.000 ore negli impianti terrestri e a circa 1000 - 2000 ore nei propulsori aeronautici.

Le scarse conoscenze che si possedevano sul comportamento a tempo costrinse per molti anni a mantenere la temperatura di esercizio degli impianti a gas al di sotto dei 680°C.

L'esperienza acquisita con le super leghe, composte da una base di Ni-Cr con tenori vari di Mo, V, Co, Ti e Al, e il raffreddamento delle pale e dei dischi delle turbine, ad esempio con aria derivata dal compressore, permettono di adottare correntemente temperature di 760°2 860°C (3).

L'impiego dei "cermets" ottenuti per sinterizzazione di materiali metallici e ceramici fa raggiungere temperature dell'ordine dei 1200°C. -Si conta in tal modo di poter adottare in un prossimo futuro temperature intorno ai 1400°C.

La temperatura di ingresso in turbina è inoltre condizionata dalle caratteristiche chimiche del combustibile, che negli impianti a gas può essere solido (polverino di carbone), liquido o gassoso.

Essa non deve superare un valore critico oltre il quale gli effetti di corrosione e di erosione,

che derivano dalla presenza di composti nocivi nei prodotti della combustione, siano di entità tale da pregiudicare in modo significativo la durata della turbina e dei combustori.

Nonostante le molte esperienze fatte con il polverino di carbone, l'impiego di questo combustibile non trova molto favore, a causa dell'ingente azione erosiva che esso esercita sulle pale della turbina.

I combustibili liquidi meno pregiati, residui della distillazione del petrolio, contengono percentuali varie di zolfo, di sodio e di vanadio, che possono essere ridotte ma non eliminate con i normali processi di depurazione.

Lo zolfo, dato l'eccesso d'aria adottato nei cicli a gas, produce anidride solforosa, la quale è un prodotto inquinante per l'ambiente in cui viene scaricata, se supera un certo limite quantitativo.

- Il pentossido di vanadio e il solfato di sodio che vengono a formarsi durante la combustione, esplicano un'azione corrosiva, che può essere contenuta mantenendo la temperatura di combustione sotto i  $760^{\circ}\text{C}$ - $780^{\circ}\text{C}$ .

Per temperature di esercizio elevate, di  $900^{\circ}\text{C}$  e oltre, si impiegano le frazioni pregiate della distillazione del petrolio. Ad esempio nei turbogetti viene bruciato cherosene e il "jet fuel", che è una miscela di cherosene e benzina.

Ad esempio, una lega con 0,45% C, 28% Cr, 16% Ni, 6% Mo, 0,65% Fe e Co a  $820^{\circ}\text{C}$  e con una tensione di 140 N/mm<sup>2</sup> ha una velocità di scorrimento di 0,001 % l'ora, e con una tensione di 100 N/mm<sup>2</sup> una velocità di 0,0001 % l'ora.