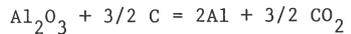


SVILUPPI A BREVE E MEDIO TERMINE NEL PROCESSO HALL-HEROULT PER RIDURRE IL CONSUMO SPECIFICO DI ENERGIA NELLA PRODUZIONE DI ALLUMINIO PRIMARIO

G. Degan, G. Fumagalli, F. Gregu, B. Mazza, G. Serravalle

In Italia, come nei Paesi produttori più avanzati, il settore alluminio ha impostato programmi di ricerca a breve e medio termine con l'intento di abbattere progressivamente l'elevato consumo specifico di energia richiesto per la produzione elettrolitica del metallo, consumo che attualmente si aggira intorno ai 15 kWh/kg in celle da 150 kA. Tale valore può essere ragionevolmente in qualche misura ridotto in quanto il processo Hall-Héroult, pur tecnologicamente maturo (è stato introdotto nel 1886), è tuttavia caratterizzato da una bassa efficienza energetica (inferiore al 50%), ciò che rende plausibile, con opportuni miglioramenti di tipo incrementale descritti nel seguito, arrivare a consumi dell'ordine di 13-13,5 kWh/kg, entro tempi brevi e con investimenti relativamente modesti. Un ulteriore abbassamento di tale limite (Ved. fig. 1) non potrà però essere conseguito se non attraverso un processo alternativo o un radicale cambiamento del processo Hall-Héroult, cioè attraverso trasformazioni che richiedono tempi medio-lunghi e notevoli investimenti. Come è noto, il processo Hall-Héroult consiste nell'elettrolisi dell'allumina, sciolta in criolite fusa (temperatura di esercizio oltre 950°C), tra elettrodi di carbone. Il passaggio della corrente elettrica produce la reazione (teorica) di cella:



L'alluminio liquido si deposita sul fondo della cella (Ved. fig. 2), mentre gli anodi vengono consumati per ossidazione a CO2 (ad un tasso pratico di circa 0,5 kg di carbone per kg di alluminio prodotto).

Il consumo specifico di energia Cs, cioè il consumo di energia elettrica (kWh in corrente continua) per kg di alluminio prodotto, è esprimibile mediante la relazione:

Cs = 2,98 E / η

dove E è la tensione applicata alla cella ed η il rendimento di corrente. Quindi gli interventi per ridurre Cs devono mirare a ridurre E ed aumentare η. Ma queste due variabili non sono indipendenti e la loro scelta, in pratica, è basata su un compromesso.

La tensione totale applicata E si può esprimere nel modo seguente:

E = Erev + ψ + Eb + Efb

dove Erev è la tensione di equilibrio, ψ la somma delle sovratensioni anodica, catodica e di concentrazione, Eb la caduta ohmica nel bagno e infine Efb la somma delle cadute ohmiche relative al sistema anodico, al sistema catodico e ai conduttori di corrente (cioè: fuori bagno). Si ha indicativamente (Ved. tab. I), nelle usuali condizioni di esercizio industriali: Erev ≈ 1,1V, ψ ≈ 0,6 V (in tale somma è pressochè nulla la sovratensione catodica, mentre è sempre rilevante la sovratensione anodica e qualche volta è rilevante la sovratensione di concentrazione). Il contributo alla tensione totale E (assunta ad es. pari a 4,3 V) delle componenti di tipo elettrochimico è quindi di circa il 40%, di cui solo il contributo di sovratensione (che rappresenta il 14% del totale) potrebbe subire in futuro una certa riduzione.

Efb, complessivamente, rappresenta il 20% circa della tensione totale e i miglioramenti sperabili non sono molto significativi: uno potrebbe consistere nell'utilizzazione di un materiale catodico di più bassa resistività elettrica rispetto al carbone per ridurre la caduta di tensione al catodo, ma questa è solo una aliquota di Efb.

Sarebbe auspicabile, invece, ottenere una forte diminuzione di Eb, che rappresenta circa il 40% di E. Eb è funzione della conducibilità elettrica del bagno e della distanza interpolare, cioè la distanza tra il piano anodico e la superficie dell'alluminio liquido che costituisce il catodo effettivo. (Si osservi che, quando nella cella circola una corrente I, Eb.I corrisponde all'energia dissipata nel bagno come calore, una parte del quale è necessario per mantenere il bagno stesso allo stato fuso).

Ora, la conducibilità del bagno può essere migliorata solo relativamente e i vantaggi che ne deriverebbero sarebbero scarsi. Il modo più diretto di diminuzione di Eb consiste quindi nel ridurre la distanza interpolare, che è un parametro operativo di facile agibilità.

Purtroppo, come già si è accennato, la cella di elettrolisi è un sistema complesso, le cui variabili sono fortemente interdipendenti e, in particolare, una riduzione della distanza interpolare è accompagnata da una riduzione del rendimento di corrente η. Ciò è spiegabile, qualitativamente, con il verificarsi di due tipi di fenomeni:

- a) ridissoluzione nel bagno (in forma di ne-

Dott. Giuseppe Degan, Dott. Franca Gregu, Alluminio Italia S.p.A., Portoscuso (CA).

Dott. Gabriele Fumagalli, Prof. Bruno Mazza, Prof. Giovanni Serravalle, Dipartimento di Chimica Fisica Applicata del Politecnico di Milano.

Tabella I - Analisi delle possibilità di riduzione a breve e a medio termine del consumo specifico di energia nell'elettrolisi per la produzione di alluminio.

	Situazione rappresentativa attuale		Miglioramento possibile a breve termine (o)		Miglioramento ipotizzabile a medio termine (oo)	
Tensione reversibile (E_{rev})	1,10 V	(25%)	1,10 V	(28+27%)	1,10 V	(34%)
Sovratensione (ψ)	0,60 V	(14%)	0,60 V	(15%)	0,60 V	(19%)
Caduta ohmica nel bagno (E_D)	1,70 V	(40%)	1,30+1,50V	(33+36%)	0,60 V	(19%)
Caduta ohmica fuori bagno (E_{fb})	0,90 V	(21%)	0,90 V	(23+22%)	0,90 V	(28%)
	4,3 V	(100%)	3,9+4,1V	(100%)	3,2 V	(100%)
<u>Tensione di cella (E)</u>	4,3 V		3,9 + 4,1 V		3,2 V	
<u>Rendimento di corrente (η)</u>	88 + 89%		90 + 92 %		92%	
<u>Consumo specifico di energia (C_s)</u>	14,5 kWh/kg Al		13+13,5 kWh/kg Al		10,5 kWh/kg Al	

(o) Mediante riprogettazione dei conduttori di corrente per ottenere un migliore equilibrio dei campi magnetici.

(oo) Mediante sostituzione del carbone catodico con materiali refrattari speciali.

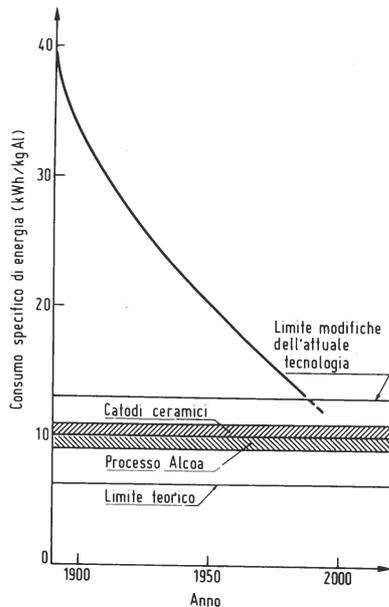


Fig.1 - Illustrazione del progresso nella riduzione del consumo specifico di energia operato sino ad oggi nell'elettrolisi per la produzione di alluminio ed indicazione del limite (13 kWh/kg) conseguibile con modifiche dell'attuale tecnologia realizzabili a breve termine, in particolare la compensazione dei campi magnetici. Confronto con il consumo specifico di energia ipotizzato per modifiche più sostanziali, quali: celle a catodi in materiali refrattari speciali (10 - 11 kWh/kg) o nuovi processi alternativi, in particolare il processo Alcoa di elettrolisi del cloruro di alluminio (9-10 kWh/kg). Il limite teorico del consumo specifico di energia (6,3 kWh/kg) corrisponde alla variazione di entalpia ΔH° associata alla reazione (teorica) di elettrolisi dell'allumina a 1000°C utilizzando anodi consumabili di carbone, aumentata dell'energia necessaria per il riscaldamento a 1000°C dei reagenti Al_2O_3 e C.

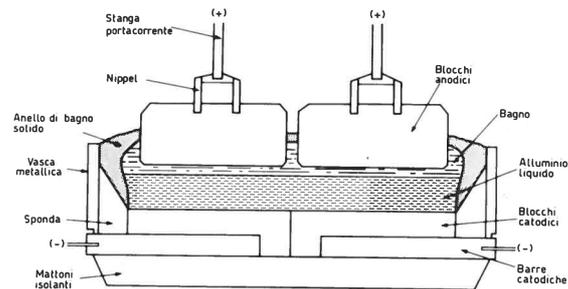


Fig. 2 - Cella industriale di elettrolisi per la produzione di alluminio, del tipo ad anodi precotti: sezione schematica. Sono evidenziati:

- la vasca coibentata;
- il contenuto del crogiolo, con le masse fuse del bagno e del metallo e l'anello di bagno solido;
- il sistema anodico, con i blocchi anodici in carbone opportunamente collegati alle stanghe portacorrente in alluminio, che a loro volta stabiliscono il contatto con i conduttori provenienti dal generatore di corrente continua (tale complesso sistema di collegamenti, delineato nella successiva figura 3 in alto, permette di abbassare il piano anodico di modo da mantenere costante la distanza interpolare man mano che gli anodi si consumano, fino alla loro sostituzione);
- il sistema catodico, con i blocchi catodici in carbone contenenti le barre catodiche in ferro, a loro volta collegate ai conduttori esterni (Ved. ancora fig. 3).

- bia) di una parte dell'alluminio separato al catodo e sua riossidazione ad opera della CO_2 una volta raggiunta la zona anodica;
- b) cortocircuitati tra l'alluminio liquido e il piano anodico.

Entrambi questi fenomeni vengono accentuati dai moti vorticosi delle masse liquide (alluminio e bagno) e dai moti ondosi della loro superficie di separazione, provocati dall'interazione nello spazio interpolare tra campo di corrente e campo magnetico generato dalle elevate correnti circolanti nel circuito di adduzione; tutto ciò, in definitiva, costringe a mantenere una distanza interpolare relativamente elevata (dell'ordine di 5 cm) e quindi ad una spesa extra di energia che deve essere dispersa in forma di calore.

A seguito di approfonditi studi di simulazione al calcolatore e di diversi lavori sperimentali è risultato che una riduzione degli effetti negativi di tipo elettromagnetico può ottenersi tramite un opportuno schema del barrame di collegamento della cella nella serie elettrica di cui fa parte, anche se i vincoli esistenti per questa via sono notevoli: di ciò si riferisce nella prima parte della memoria.

Un miglioramento più consistente si potrebbe ottenere con una drastica diminuzione dello spessore dello strato di alluminio fuso all'interno della cella, portandolo a un velo sottile fluente sopra il catodo, con minore capacità di oscillazione e quindi, in definitiva, con possibilità di esercire la cella a distanza interpolare ulteriormente ridotta. Purtroppo, però, l'alluminio non bagna il carbone: occorre quindi mantenere un certo spessore di metallo fuso sul fondo della cella, spessore che per contrastare le perturbazioni dovute agli effetti elettromagnetici deve essere notevole (dell'ordine di 30-35 cm; ciò è anche necessario per l'adeguato smaltimento del calore in eccesso). Si pensa di conseguire questo obiettivo sostituendo i catodi convenzionali con catodi in opportuni materiali ceramici: di ciò si riferisce nella seconda parte della memoria.

STUDIO E CONTROLLO DEGLI EFFETTI DEI CAMPI MAGNETICI

Come si è già accennato, l'interazione dei campi magnetici, generati dalle forti correnti necessarie alla produzione industriale dell'alluminio, con la corrente nell'elettrolita e nel metallo fusi contenuti nelle celle, ha effetti negativi sulle prestazioni di queste ultime.

Le celle elettrolitiche sono collegate in serie di 100-200 unità che si sviluppano su due file parallele e a distanza ravvicinata (un'andata e un ritorno). La corrente è tipicamente, negli impianti moderni, di 150-200 kA. Il collegamento elettrico tra il catodo di una cella e l'anodo di quella successiva è realizzato da un complesso schema di conduttori (Ved. fig. 3), che crea nello spazio circostante, e in particolare all'interno della cella, un campo del vettore induzione magnetica \underline{B} di forma assai complicata (Ved. fig. 4). La corrente, di distribuzione descritta dal corrispondente vettore densità \underline{i} , è trasportata, nello spazio interelettrodo, da mezzi liquidi: il bagno e il metallo fusi. Le forze laplaciane risultanti, del tipo:

$$\underline{L} = \underline{i} \wedge \underline{B}$$

(forze di volume all'interno dei fusi e forze di superficie alla loro superficie di contatto, in relazione alla presenza di discontinuità nelle forze laplaciane stesse), producono quindi movimenti dei fusi, disturbando la regolarità del processo. Le forze magnetiche e i moti prodotti sono tanto maggiori quanto più grande è la cor-

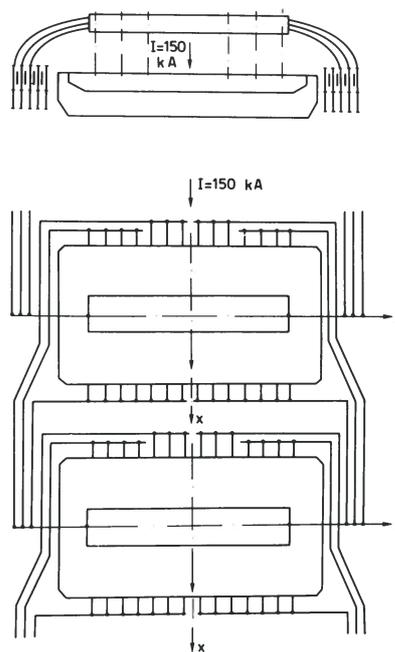


Fig. 3 - Sistema di trasporto della corrente tra le celle di un impianto per la produzione di alluminio: alzato (sopra) e pianta (sotto). Disposizione delle celle per traverso.

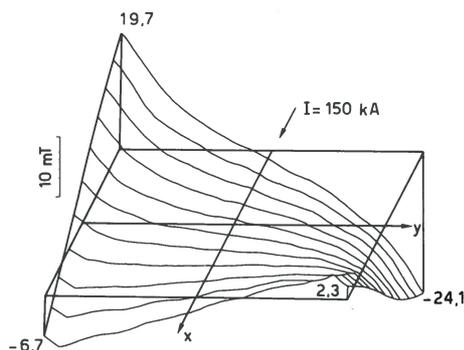


Fig. 4 - Componente verticale del vettore induzione magnetica B_z (mT; 1 mT = 10 gauss) all'interno di una cella di elettrolisi per la produzione di alluminio (disposizione per traverso).

rente nella serie.

Il problema magnetico si è imposto all'attenzione dei produttori di alluminio quando, tra il 1950 e il 1960, furono costruiti i primi impianti da 100 kA e più.

Gli effetti principali dei campi magnetici si possono riassumere nei seguenti (Ved. fig. 5):

- dislivellamento e incupolamento del metallo che provocano un anomalo consumo anodico;
- moti vorticosi nel metallo e nel bagno che provocano un calo del rendimento di corrente, una usura precoce del crogiolo catodico ed anche (rendendo mal profilato e disuniforme nello spessore l'anello di bagno solido che funge da volano termico) una diminuzione dell'inerzia della cella a modificare il proprio regime energetico, a variare la temperatura del bagno, ecc.;
- oscillazione della superficie del metallo fino anche a provocare dei corticircuiti con il piano anodico, il che costringe ad incrementare la distanza interpolare.

Fin dai primi studi teorici si è capito che si potevano migliorare le prestazioni industriali riducendo il valore assoluto di B e facendo in modo che esso, all'interno della cella, obbedisse ad alcune regole di simmetria (ad esempio il valore medio della sua componente verticale sulla superficie di elettrolisi deve essere il minore possibile). Per realizzare queste condizioni occorre progettare opportunamente la disposizione dei conduttori che trasportano la corrente nella serie di celle.

L'Alluminio Italia si occupa da molti anni di questi problemi. L'esperienza si è accresciuta con la costruzione di due impianti da 150 kA a Fusina (VE) e a Portovesme (CA). Poichè nelle celle di elettrolisi interagiscono fenomeni elettrici, termici, magnetici e fluidodinamici, è stato elaborato un sistema di modelli di calcolo per la valutazione coordinata di tutti i fenomeni, denominato SPACE (Sistema di Progettazione Automatica delle Celle di Elettrolisi). Il sistema permette di calcolare la distribuzione delle correnti e dei campi magnetici all'interno della cella e di calcolare i moti dei fluidi e la forma della superficie di separazione tra bagno e metallo. Inoltre, un programma di misure sperimentali sulle celle in esercizio fornisce i dati necessari alla messa a punto dei modelli e contribuisce alla conoscenza più approfondita dei fenomeni [1]. Questi studi sono in parte finanziati dal CNR nell'ambito del Progetto Finalizzato Metallurgia.

Il trasferimento delle soluzioni ottimali su un impianto è sottoposto a numerosi vincoli di carattere tecnico ed economico. La distribuzione dei conduttori ideale per il controllo degli effetti magnetici, per esempio, può richiedere percorsi troppi lunghi, e quindi elevate cadute di tensione improduttive. Ancora più difficile è perfezionare gli impianti già esistenti. Le modifiche infatti devono poter essere introdotte senza disturbare la normale attività, se non si vuole fermare la produzione. Particolarmente interessanti sono gli interventi che possono essere effettuati sulle singole celle e che possono essere quindi eseguiti al momento della fermata per il rifacimento del crogiolo.

Le sperimentazioni industriali effettuate negli ultimi tempi dall'Alluminio Italia riguardano:

- la compensazione del campo magnetico dovuto alla serie di celle vicina mediante un campo antagonista creato da un conduttore supplementare;
- la schermatura della cella mediante masse ferromagnetiche opportunamente disposte.

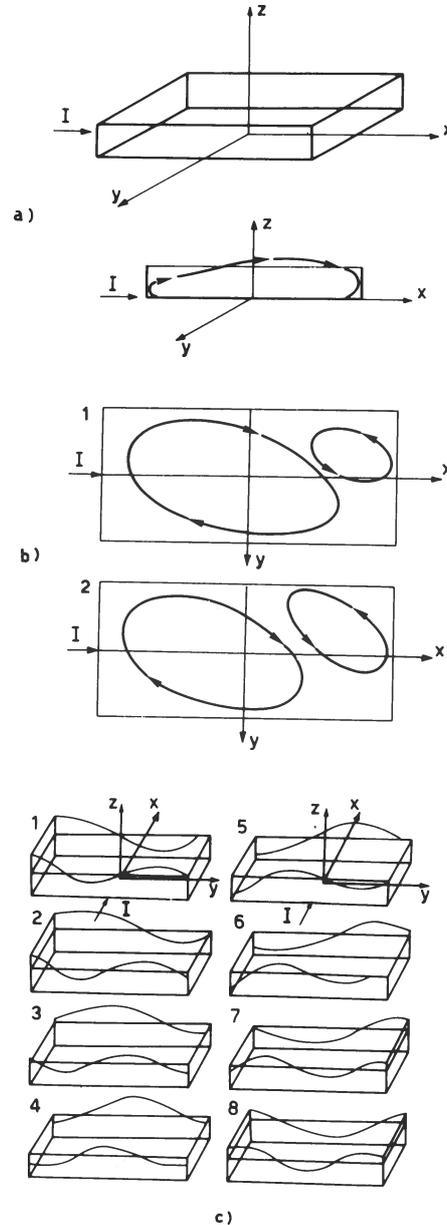


Fig. 5 - Schematizzazione degli effetti principali del campo magnetico in una cella di elettrolisi per la produzione di alluminio: a) dislivellamento e incupolamento del metallo; b) moti vorticosi nel bagno (1) e nel metallo (2); c) oscillazione della superficie del metallo (evoluzione temporale: periodo $T \approx 60s$; $1:t=0$; $2:t=1/8 T$; $3:t=2/8 T$; ...; $8:t=7/8 T$). Disposizione delle celle: per il lungo (a, b) e per traverso (c).

Poichè le modifiche sono state apportate su celle le cui condizioni erano identiche a quelle standard tranne che per la situazione magnetica, il caso è particolarmente adatto alla verifica delle teorie esistenti sulla stabilità magnetica delle celle. Esiste [2] una condizione molto semplice alla quale devono soddisfare alcune variabili operative della cella affinché la sua marcia sia stabile (nel senso che eventuali perturbazioni alla superficie di separazione tra alluminio liquido e bagno abbiano a smorzarsi anzichè ad esaltarsi):

$$(D + D_0) H > A |\bar{B}_z| I$$

dove D è la distanza interpolare (cm), H l'altezza del metallo (cm), $|\bar{B}_z|$ il valore assoluto del valor medio della componente verticale dell'induzione magnetica sulla superficie di elettrolisi (T), I la corrente di linea (kA), A una costante che vale $5 \cdot 10^2 \text{ cm}^2 \text{ T}^{-1} \text{ kA}^{-1}$, D_0 un'altra costante che nel caso di anodi precotti vale 4 cm.

La relazione suddetta mette chiaramente in evidenza come il campo magnetico influisca sul consumo specifico di energia (Ved. ancora tab. I): infatti al diminuire di $|\bar{B}_z|$ si può abbassare D . Ciò comporta la diminuzione della caduta ohmica nel bagno e rende possibile l'abbassamento del deposito di alluminio, di conseguenza si riduce anche il volume dei materiali da mantenere fusi e quindi la dispersione di calore.

Per esempio, a Portovesme l'inserimento del campo antagonista ha ridotto $|\bar{B}_z|$ di circa 7 volte, il che ha permesso di abbassare il consumo specifico di energia di più di 1 kWh per kg di alluminio prodotto e di ottenere numerosi altri benefici dovuti alla maggiore regolarità del processo.

La riduzione dei campi magnetici dovuta agli schermi è stata misurata sperimentalmente a causa della difficoltà di calcolare l'effetto di una struttura ferromagnetica così complessa. I vantaggi ottenuti sulle prestazioni industriali sono stati meno consistenti, soprattutto per la minore regolarità spaziale delle correzioni magnetiche introdotte. L'intervento è però più economico, ed è particolarmente adatto ad essere usato su celle in condizioni anomale, come quelle situate alle estremità delle serie di elettrolisi.

CATODI IN MATERIALI REFRAATTARI SPECIALI

Oltre a curare lo sviluppo dell'elettrolisi convenzionale attraverso la ricerca di miglioramenti di tipo incrementale (Ved. par. precedente), l'Alluminio Italia, con il finanziamento parziale del CNR nell'ambito del Progetto Finalizzato Metallurgia e in collaborazione con il Dipartimento di Chimica Fisica Applicata del Politecnico di Milano e con l'Istituto di Chimica Industriale della Facoltà di Ingegneria della Università di Padova, attualmente sta valutando la fattibilità tecnica e la convenienza economica della sostituzione del catodo convenzionale in carbone con alcuni materiali refrattari speciali (specificatamente i boruri o carburi di titanio e di zirconio), aventi le caratteristiche fondamentali richieste allo scopo: bagnabilità da parte dell'alluminio liquido, buona resistenza alla corrosione e buona conducibilità elettrica (Ved. tab. II). Tale sostituzione [3,4,5] potrebbe consentire di raggiungere una riduzione sostanziale del consumo specifico di energia, confrontabile con quella potenzialmente ottenibile attraverso un processo alternativo. Valutazioni preliminari, da verificare sperimentalmente in celle pilota, fanno supporre che il consumo

specifico di energia raggiungibile sarebbe dell'ordine di 10-11 kWh per kg di alluminio, cioè del 25% circa inferiore a quello realizzato negli impianti industriali attualmente più avanzati (Ved. ancora tab. I).

Il risparmio deriverebbe dal fatto che i materiali refrattari speciali sono, a differenza del carbone, bagnabili dall'alluminio liquido, per cui si potrebbe ridurre il livello del metallo nelle celle (che, come si è detto, è di circa 30-35 cm) ad uno strato sottile di superficie regolare fluente sopra il catodo. In queste condizioni sarebbe possibile abbassare la distanza interpolare dai 5 cm attuali a 1,5-2 cm mantenendo elevato, almeno a priori, il rendimento di corrente, e quindi, per la minore caduta ohmica nel bagno, risparmiare sul consumo specifico di energia.

Un progetto di questo tipo si presenta molto allettante perchè unisce la possibilità di realizzare un consistente risparmio d'energia a quella di un trapasso non traumatico verso la nuova tecnologia. Infatti, mentre un processo alternativo all'elettrolisi tradizionale non potrebbe essere realizzato se non sostituendo completamente gli impianti esistenti, le celle a catodi speciali potrebbero sostituirsi alle celle attuali senza implicare un rinnovamento totale degli impianti, perchè la base concettuale e impiantistica del processo Hall-Héroult rimarrebbe inalterata.

Le difficoltà che invece ostacolano il progetto, sia di ordine tecnico che economico, non sono superabili sempre e soltanto attraverso lo sforzo dell'industria dell'alluminio. Il successo di un progetto di questo tipo è infatti legato alla disponibilità quantitativa e qualitativa di materiali resistenti ad elevate temperature e ad ambienti fortemente corrosivi, ciò che è tipico di molti settori.

Nel caso dei materiali refrattari speciali, una notevole limitazione è determinata dagli alti costi dovuti ai complessi metodi di preparazione, che fra l'altro influenzano le proprietà chimiche e fisiche dei materiali stessi. Un altro ostacolo di rilievo è quello dei formati disponibili: ciò pone di fronte all'alternativa dell'utilizzo dei nuovi materiali in forma massiccia, oppure in forma di deposito in strato sottile su apposito substrato. Tutto questo condiziona naturalmente lo sviluppo di una domanda concreta da parte del settore alluminio, e parallelamente lo sviluppo di una offerta da parte dei produttori di materiali refrattari speciali. Infatti, i costi elevati e i formati particolari disponibili (piastre, cilindri, ecc.) frenano sia economicamente che tecnicamente lo sviluppo di catodi massicci; d'altra parte, la tecnologia di deposizione in strato sottile non è ancora arrivata a risultati sufficientemente validi, almeno per la realizzazione di un impianto pilota. Il progetto non esclude comunque un futuro orientamento in quest'ultima direzione e attualmente si sta studiando la possibilità di realizzare le condizioni idonee alla deposizione di materiale refrattario in strato sottile su grafite mediante tecniche laser.

La situazione ora illustrata si riflette ovviamente sulla progettazione di un modello di cella che possa essere valido ai fini dell'utilizzo dei nuovi materiali e tale da permettere di conseguire il risparmio di energia atteso. In campo internazionale sono stati progettati fondamentalmente due modelli di cella (descritti schematicamente nelle figure 6 e 7), di cui il secondo, brevettato dalla Kaiser, è stato anche realizzato ed esercito in scala pilota [6].

Il modello estremamente innovativo di cella ad

Tabella II - Proprietà di alcuni materiali refrattari speciali.

Materiale	Densità teorica (g/cm ³)	Temperatura di fusione (°C)	Resistività elettrica a 25°C (μΩcm)	Resistività elettrica a 1000°C (μΩcm)	Conducibilità termica a 25°C (W/cm°C)	Coefficiente di espansione termica fra 25 e 1000°C (°C ⁻¹ ×10 ⁶)	Resistenza a flessione a 25°C (MPa)
TiB ₂	4,52	2850±2980	9 ± 15	60	0,24 ± 0,59	4,6	241
ZrB ₂	6,09±6,17	3000±3040	7 ± 16,6	74	0,24	5,9	200
TiC	4,92±4,95	3067±3250	51 ± 250	119	0,17 ± 0,21	5,5 ± 7,74	240±855
ZrC	6,46±6,56	3240±3540	42 ± 75	138±160	0,21	6,0 ± 6,7	338
Carbone catodico (o)	1,92	3500	3500	1500	0,11	2,4	
Grafite (o)	2,23	3500(subL)	1100		1,00	2	

(o) Considerati per confronto. Per il carbone catodico i dati riportati sono le specifiche fornite dalla Società SERS, Parigi.

elettrodi bipolari De Varda (Ved. fig. 8) sviluppato tempo addietro [7] dalla Montecatini (una delle società da cui si è originata l'attuale Alluminio Italia), potrebbe essere riproposto per essere realizzato con materiali più idonei, non avendo dato i risultati sperati essenzialmente per problemi di materiali.

L'ottenimento dei materiali refrattari speciali nei formati, nella qualità ed ai costi richiesti per prospettare un valido esercizio industriale, è una condizione necessaria ma non sufficiente per lo sviluppo delle nuove celle: esiste [5], infatti, tutta una serie di problematiche, indipendenti in buona parte dalle caratteristiche stesse dei materiali ed invece legate alle esigenze del processo Hall-Héroult, che merita una approfondita valutazione sperimentale in scala pilota.

La principale difficoltà è quella relativa al mantenimento di un buon rendimento di corrente. Come è noto, la riduzione della distanza interpolare al di sotto di un certo limite influisce comunque negativamente sul rendimento di corrente (fondamentalmente perché viene favorita l'ossidazione anodica delle nebbie metalliche) anche in assenza di agitazione dei fusi dovuta agli effetti elettromagnetici. Un'altra incognita è costituita dalla ripartizione dei processi catodici in una cella modificata, caratterizzata da una minore agitazione del bagno, dove potrebbe essere favorita la concorrente deposizione di sodio.

Anche l'aspetto del bilancio termico merita una particolare attenzione. Come è noto, in una cella convenzionale oltre il 50% dell'energia fornita si disperde nell'ambiente sotto forma di calore, che viene prodotto per effetto Joule soprattutto nella zona interpolare. In una cella modificata tale quantità di calore sarà notevolmente ridotta, come conseguenza della riduzione della distanza interpolare; sarà però nel contempo ridotta anche la capacità di smaltire calore da parte della cella, non disponendo quest'ultima di metallo liquido, che è un ottimo conduttore termico, né dell'agitazione elettromagnetica del bagno, che contribuisce anch'essa allo smaltimento. E' presumibile comunque che si incontrino problemi di coibentazione.

Attualmente, l'Alluminio Italia, con gli Istituti Universitari prima citati, è impegnata nelle fasi preliminari del progetto che si realizzano in scala di laboratorio. La valutazione del comportamento elettrochimico, chimico e meccanico dei materiali refrattari speciali è la condizione

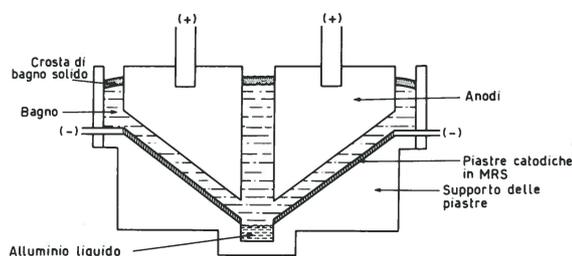


Fig. 6 - Esempio di cella di elettrolisi per la produzione di alluminio con catodi in materiali refrattari speciali (MRS): sezione schematica.

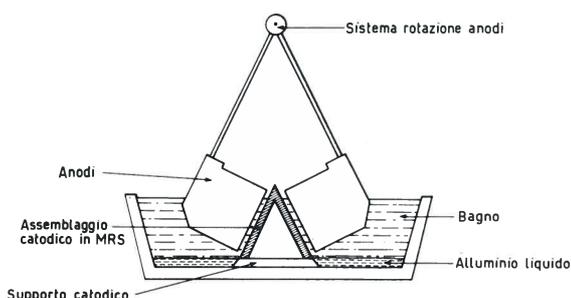


Fig. 7 - Cella Kaiser per la produzione di alluminio con catodi in materiali refrattari speciali (MRS): sezione schematica.

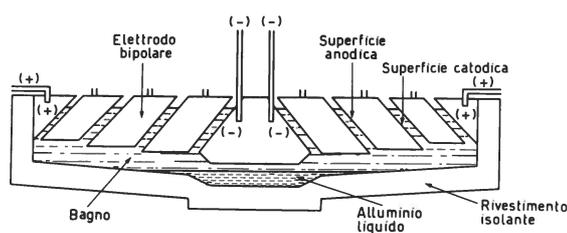


Fig. 8 - Cella De Varda per la produzione di alluminio con elettrodi bipolari: sezione schematica.

essenziale per intraprendere in un prossimo futuro una sperimentazione in scala pilota. Una concretizzazione su scala industriale, invece, non potrà avvenire che in tempi medio-lunghi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. CHERCHI, G. DEGAN: Oscillations of liquid aluminium in industrial reduction cells. An experimental study. *Light Metals* 1983, pag. 457-467, The Metallurgical Society of AIME, New York, 1983.
- [2] T. SELE: Instabilities of the metal surface in electrolytic alumina reduction cells. *Metallurgical Transactions*, vol. 8B, n.12, pag. 613-618, dicembre 1977.
- [3] K. BILLEHAUG, H.A. ØYE: Inert cathodes for aluminium electrolysis in Hall-Héroult cells. Parte I, *Aluminium*, vol. 56, n.10, pag. 642-648, ottobre 1980. Parte II, *Aluminium*, vol. 56, n.11, pag. 713-718, novembre 1980.
- [4] J.B. TODD: Energy reduction in Hall-Héroult cells with conventional and special electrodes. *Journal of Metals*, vol. 33, n. 9, pag. 42-45, settembre 1981.
- [5] A. BONFIGLIOLI, F. GREGU, G. SERRAVALLE, B. MAZZA, G. FUMAGALLI, D. FESTA, R. DAL MASCHIO: Riduzione sostanziale del consumo energetico nella produzione di alluminio primario mediante nuovi materiali catodici: stato dell'arte e prospettive. Parte I, *La Metallurgia Italiana*, vol. 75, n. 3, pag. 194-204, marzo 1983. Parte II, *La Metallurgia Italiana*, vol. 75, n. 4, pag. 259-274, aprile 1983.
- [6] R.C. DORWARD, J.R. PAYNE: Energy savings through the use of an improved aluminum reduction cell cathode. Contract Kaiser Aluminum and Chemical Corp. - U.S. Department of Energy DE-AC03-76CS40215. Rapporti d'avanzamento vari, 1980, 1981, 1982.
- [7] G. DE VARDA: Report on recent developments in the field of multicell furnaces for aluminium. ICSOBA International Meeting on Anode Problems in Aluminium Electrolysis, Milano, giugno 1971. *Travaux de l'ICSOBA* No. 10, pag. 145-153, ICSOBA, Budapest, 1973.