

**VII MEETING SUL TITANIO**

**Organizzato dalla GTT**

**15 Novembre 1991**

**GTT**

**GINATTA TORINO TITANIUM**

## INDICE

- Marco V. Ginatta Pag. 1.1  
GTT S.p.A.  
**INTRODUZIONE**
  
- Vladimir N. Zamkov Pag. 2.1  
E. o. Paton Electric Welding  
Institute (URSS)  
**ADVANCES IN THE FIELD OF TITANIUM  
WELDING TECHNOLOGY**
  
- Raymond G. Portman Pag. 3.1  
Buntig Titanium Ltd. (Gran Bretagna)  
**OFFSHORE OIL AND GAS MARKET -  
THE PROBLEMS OF SELLING TITANIUM**
  
- Alessandro Fabroni Pag. 4.1  
Fabroni Engineering (Italia)  
**IL TITANIO E LE SUE LEGHE COME MATERIALE  
STRUTTURALE NELLE COSTRUZIONI NAVALI**
  
- Max P. Schlienger Pag. 5.1  
Retech, Inc. (USA)  
**PLASMA HEARTH MELTING OF TITANIUM  
AND TITANIUM ALLOYS**
  
- Elena M. Brach del Prever Pag. 6.1  
Centro Traumatologico Ortopedico (Italia)  
**APPLICAZIONI DEL TITANIO IN AMBITO  
ORTOPEDICO E TRAUMATOLOGICO**
  
- Michael Drasdo Pag. 7.1  
Tubesales Ltd. (Gran Bretagna)  
**FURTHER DEVELOPMENTS IN TITANIUM  
AEROSPACE TUBING AND VERSATILITY  
OF TITANIUM IN SPORTS**
  
- Ezio Debernardi Pag. 8.1  
GTT S.p.A.  
**SVILUPPI NELLA PRODUZIONE E NELLE  
APPLICAZIONI DEL TITANIO IN ITALIA**
  
- Jean K. Gregory Pag. 9.1  
GKSS Research Center (Germania)  
**HEAT TREATMENTS AND MECHANICAL  
BEHAVIOR IN Beta-C<sup>TM</sup>**
  
- S. S. Ushkov, .A. Kudrjavytzev Pag. 10.1  
Prometey (URSS)  
**THE MAIN PROBLEMS OF TITANIUM AND  
TITANIUM ALLOYS CIVIL APPLICATION**

- Ettore Alunni  
Fucine Umbre S.r.l. (Italia)  
**CONSIDERAZIONI SUL PROCESSO DI FORGIATURA SUPERPLASTICA**

Pag. 11.1
- Jean Paul Winsky  
Nobel Explosifs (Francia)  
**TITANIUM-STEEL EXPLOSION BONDED CLAD PLATES**

Pag. 12.1
- Emilio Olzi  
C.N.R. - I.T.M. (Italia)  
**IL TITANIO NEI MATERIALI INNOVATIVI FUNZIONALI**

Pag. 13.1
- Alok Choudhury  
Leybold Durferrit GmbH (Germania)  
**ELECTROSLAG REMELTING OF TITANIUM**

Pag. 14.1
- Janet Koscianski  
Shippensburg University (U.S.A.)  
**OPTIMAL PRODUCTION AND TRADE IN INTERNATIONAL TITANIUM MARKETS**

Pag. 15.1
- Giuseppe Garrasi  
I.R.E.S. (Italia)  
**PROTEZIONE AMBIENTALE NELLA PRODUZIONE DEL TITANIO**

Pag. 16.1
- Ion Greavu  
Metav S.A. (Romania)  
**PRESENTING A NEW TITANIUM FOUNDRY IN EUROPE**

Pag. 17.1

**POSTERS**

- Ferdinando Felli  
Università "La Sapienza" (Italia)  
Paolo Maria Lingua  
GTT S.p.A.  
**ESAMI PRELIMINARI SU STRUTTURA E CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN FORGIATO SPERIMENTALE IN LEGA Ti-3Al-8V-6Cr-4Ho-4Zr**

Pag. 18.1
- I. V. Zarutsky, V. I. Shapoval  
Institute of General and Inorganic Chemistry (U.R.S.S.)  
**ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS MECHANISM TiB<sub>2</sub> MELT FROM HALOGEN COMPOUND**

Pag. 19.1

DISCORSO INTRODUTTIVO AL VII MEETING SUL TITANIO  
Marco V. Ginatta - GTT S.p.A.

Signore e Signori, Buongiorno.

A nome della GTT dò il benvenuto ai partecipanti a questo settimo convegno sul titanio.

Anche quest'anno siamo lieti di offrire una opportunità di incontrarsi, di discutere nuove applicazioni, di parlare di titanio, di curare nuovi mercati, di organizzare nuove iniziative.

Fa particolarmente piacere a noi del settore del titanio vedere quanti operatori hanno deciso di dedicarvi il loro tempo, che come ben sappiamo quello disponibile costituisce una risorsa sempre più scarsa, ma importante per lo sviluppo del nostro metallo.

Stiamo vivendo un momento di transizione, da un'industria tradizionalmente concepita a un insieme di attività industriali di sempre maggiore contenuto tecnologico.

Sebbene piccolo nel panorama generale, è molto importante per noi lo sforzo che facciamo tutti insieme per sviluppare e seguire questa direzione in cui fermamente crediamo.

E' indispensabile inserirsi sempre più in un contesto tecnologicamente avanzato come l'Europa in cui tutte le attrezzature, gli impianti, le competenze, la professionalità, se esistono al mondo in Europa sono disponibili. Perciò è molto importante dedicarsi ad attività innovative considerando che i paesi emergenti, i nuovi industrializzati, saranno occupati con tecnologie meno avanzate che la nostra, non avendo le possibilità che abbiamo qui in Europa.

In base ai risultati visti in questi ultimi dodici mesi, abbiamo la sensazione di aver ottenuto enormi progressi con l'inserimento del titanio nel settore dell'edilizia, essendo il primo materiale metallico che ha le caratteristiche adatte per essere integrato con i materiali da costruzione.

Ottimi risultati sono anche stati raggiunti mediante la sua applicazione in campo nautico. In particolare in occasione del Salone Nautico di Genova abbiamo constatato che gli operatori sono già tutti informati sulle lavorazioni del titanio, hanno già delle esperienze sia come costruzione di scafi che come costruzioni portuali.

Con l'applicazione di una nuova politica di mercato impostata sul "just in time" si prevede l'immediato inserimento in produzione del materiale scartando la possibilità di un tempo di ritorno di materiali eventualmente difettosi o non a specifica, a favore quindi della qualità del prodotto, che ha assunto un ruolo ancora più importante.

Il titanio ha vissuto tutta la sua vita, sin dall'inizio negli usi aeronautici, con altissime specifiche di qualità, quindi non ha avuto difficoltà ad adottare questa nuova impostazione del flusso dei materiali.

Ora, tra i risultati tecnici ottenuti nel corso dello scorso anno, abbiamo raggiunto alcuni obiettivi ed ho il piacere di annunciare che abbiamo costruito il nuovo forno di fusione titanio sotto scoria(ESR) per la prima volta in Italia. Questa tecnologia non esiste ancora negli USA, e i suoi pionieri sono scienziati e tecnici russi che abbiamo il piacere e l'onore di avere qui questa mattina. Da molto tempo desideravamo dimostrare all'Istituto Paton il nostro apprezzamento per l'eccellente lavoro svolto per l'industria nel settore del titanio, specialmente per aver messo a punto la tecnologia di saldatura, oggi così diffusa e utilizzata nella fabbricazione di numerosi manufatti.

Con grande piacere invito il Prof. Zamkov al podio per consegnargli la nostra targa che ritira a nome dell'accademico Paton.

## ADVANCES IN THE FIELD OF TITANIUM WELDING TECHNOLOGY

V. N. Zamkov, V. P. Prilutskii , Yu. K. Novikov

E.O. Paton Electric Welding Institute  
of the Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Due to their unique physico-chemical properties, titanium alloys in the volumes of application in weld structures are now inferior only to steel and aluminium, and the manufacturing process will lead to the further expansion of the volumes and fields of their application. In addition to traditional applications of titanium alloys in aerospace industry, shipbuilding and chemical engineering, titanium is likely to be used in transport engineering, medicine, construction, food and textile engineering, etc.

For these industries the titanium treatment and welding processes should provide the high quality of welded joints and, besides, should be simple, cheap and highly productive.

At the same time, there appear certain difficulties in welding of titanium which, even at the initial period of the commercial application of titanium, have preconditioned welding methods suitable for it: in inert gases (argon, helium) and in vacuum (Fig.1).

Many-year theoretical researches conducted at the E.O.Paton Electric Welding Institute and verified by experiments allowed to develop the new approaches to the problems of metallurgy and technology of titanium alloy welding.

Novelty of these approaches consists in the fact that titanium is welded in active environment comprising halogenides of alkali and alkali-earth metals. A new class of consumables for welding of titanium, i.e. fluxes and flux-cored filler wires. has been created On the base of fluorides of these metals. These consumables enabled not only to increase the efficiency of the existing welding methods, but to develop the new ones ensuring the high quality of welded joints.

These welding methods include: automatic submerged-arc welding, electroslag welding, argon tungsten-electrode

semisubmerged arc welding and argon-arc tungsten-electrode flux-cored wire welding (Fig.1).

Automatic consumable-electrode submerged arc welding of titanium can be performed with the equipment used usually for welding of steel by this method. Depending on a thickness of members joined, fluxes AHT-1, AHT-3 and AHT-7, and welding titanium wire from 2.5 to 5 mm dia. can be used. This welding method is characterized by good formation of butt, fillet, T- and overlap joints, high level of mechanical and corrosion properties of welded joints in commercial titanium, and pseudo-alloys. Reliability, simplicity, high speed of welding (up to 50 m/h), possibility to make welds in up to 12 mm thick metal without groove preparation by one-sided welding and up to 25 mm thick metal by double-sided welding provide the high efficiency and economy of this technology (Fig.2,3).

Electroslag welding of titanium is one of the most important achievements in the field of titanium welding technology. Flux AHT-2 and argon shielding of slag pool used in welding allow to produce welded joints in commercial titanium and pseudo-alloys of practically any thicknesses. Mechanical properties and gas impurity content of weld metal and the HAZ are at the level of base metal. Titanium alloys 30-350 mm thick at the weld length up to 600 mm are welded with plate electrodes.

Electroslag consumable-nozzle welding is used for making both straight and curvilinear welds. There is an experience gained in the field of welding of above 1000 mm thick alloy ПТ-3В.

Electroslag wire electrode welding is designed to join titanium pieces 30-150 mm thick. Welding speed is 0.5-1.7 m/h, depending on the type of electrodes used.

Electroslag welding of titanium is the efficient and economic technology for fabrication of thick-walled titanium welded structures which in a number of cases has no alternative (Fig.4,5).

Application of halogenide fluxes in argon-arc tungsten-electrode welding of titanium causes contraction of the arc and, hence, increase in penetration depth, decrease in weld width and

heat input. This welding method is used for making all types of welds in commercial titanium,  $\alpha$ -, pseudo- $\alpha$  - and ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys 0.8-6 mm thick. Semisubmerged arc welding is performed in one pass without groove preparation. This technology features the possibility to make welds with different penetration shapes, e.g. weld width is larger than, equal to or less than the back bead width. The small sizes of welding pool allow to perform automatic argon tungsten-electrode semisubmerged arc welding on a vertical plane with horizontal and vertical welds.

Fluxes AHT-23A and  $\Phi$ AN-1 can be used, depending on a thickness of metal welded and a type of alloy, their consumption being insignificant and making-up not more than 10 g per 1 m of a weld (Fig.6,7).

Elimination of pores in welds, decrease in consumption of welding consumables, power, reduction of deformations - these are the characteristic advantages of argon-arc welding using the above fluxes.

It should be emphasized, that no pores are detected in welds made with all welding methods considered in the present paper. It results from metallurgical interaction between fluoride slags and welding pool metal.

Argon-arc tungsten-electrode flux-cored filler wire welding is efficient for joining the 5-16 mm thick metal. Here, two types of wires have been developed: ППТ-1 and ППТ-3 grades with flux and flux-metal cores. They can be used for welding of titanium within the said range of thicknesses without groove preparation in one pass (Fig.8,9).

Consumption of the flux-cored wire is 1.2-1.4 m per 1 m of a weld.

It should be noted, that semisubmerged-arc and flux-cored filler wire welding is performed with the standard commercial equipment designed for argon-arc tungsten-electrode welding.

Fig.10 shows the results of technico-economic analysis of the welding methods considered against argon-arc tungsten-electrode welding.

The following basic indices calculated per weld meter

were compared:

- 1) welding time;
- 2) argon flow rate;
- 3) welding wire consumption;
- 4) power consumption.

Values of these indices for argon-arc tungsten-electrode welding wire assumed as equal to 100 %.

It can be seen from Fig.10a that the application of the AHT-23A type flux for argon-arc tungsten-electrode welding of titanium up to 3 mm thick reduces argon flow rate by more than 50 % decreases welding wire consumption by 30 % and saves up to 25 % of power. Total cost of one meter of a weld decreases by 15-20 %.

In semisubmerged arc welding of 3-6 mm thick titanium by using the ФАН-1 grade flux the time of welding and the consumption of welding consumables (argon and welding wire) are reduced by more than 60 % (Fig.10b). Allowing for the extra costs of the flux, the cost of one meter of a weld is almost twice as low.

Application of flux-cored filler wire in argon-arc tungsten-electrode welding of 4-16 mm thick titanium reduces the time of welding and the consumption of argon by 70 %, the consumption of welding wire - by almost 90 % and the consumption of power - by 60 % (Fig.10c). All this cuts down the costs of one meter of a weld approximately by 35-40 %.

Automatic consumable-electrode submerge-arc welding reduces the welding time and the power consumption by 75 %, the welding wire consumption - by 25 % (Fig.10d). In this welding method argon is not used. The total cost of a weld, as in the previous case, is reduced by 35-40 %.

Thus, the new approaches to the problems of metallurgy and technology of titanium welding led to creation of the new efficient and economic methods for fabrication of titanium welded structures.

## LIST OF FIGURES

- Fig.1. Classification of titanium welding methods.
- Fig.2. Appearance of titanium weld made by automatic submerged arc welding using flux AHT-7.
- Fig.3. Battery of high pressure filters made by automatic submerged-arc welding.
- Fig.4. Macrosection of welded joint in alloy ПТ-3В (metal thickness - 250 mm) made by electroslag method.
- Fig.5. Commercial BT1-0 titanium flange billet welded by electroslag method.
- Fig.6. Thin-walled welded profiles of titanium alloy OT4-1 made by argon tungsten-electrode semisubmerged arc welding using flux AHT-23A.
- Fig.7. Ventilation commercial BT1-0 titanium pipe (120 m high) made by argon tungsten-electrode semisubmerged arc welding using flux ФАН-1.
- Fig.8. OT4 alloy frame member (15 mm thick) made by argon-arc tungsten-electrode flux-cored filler wire welding.
- Fig.9. Electrolyser cathode drum billets made by argon-arc tungsten-electrode flux-cored filler wire welding.
- Fig.10. Relative values of welding time, argon, filler wire and power consumptions in welding of one meter or a weld:  
a - semisubmerged welding of up to 3 mm thick metal;  
b - semisubmerged welding of 3-6 mm thick metal;  
c - flux-cored filler wire welding of 4-16 mm thick metal;  
d - submerged-arc welding of 3-16 mm thick metal.

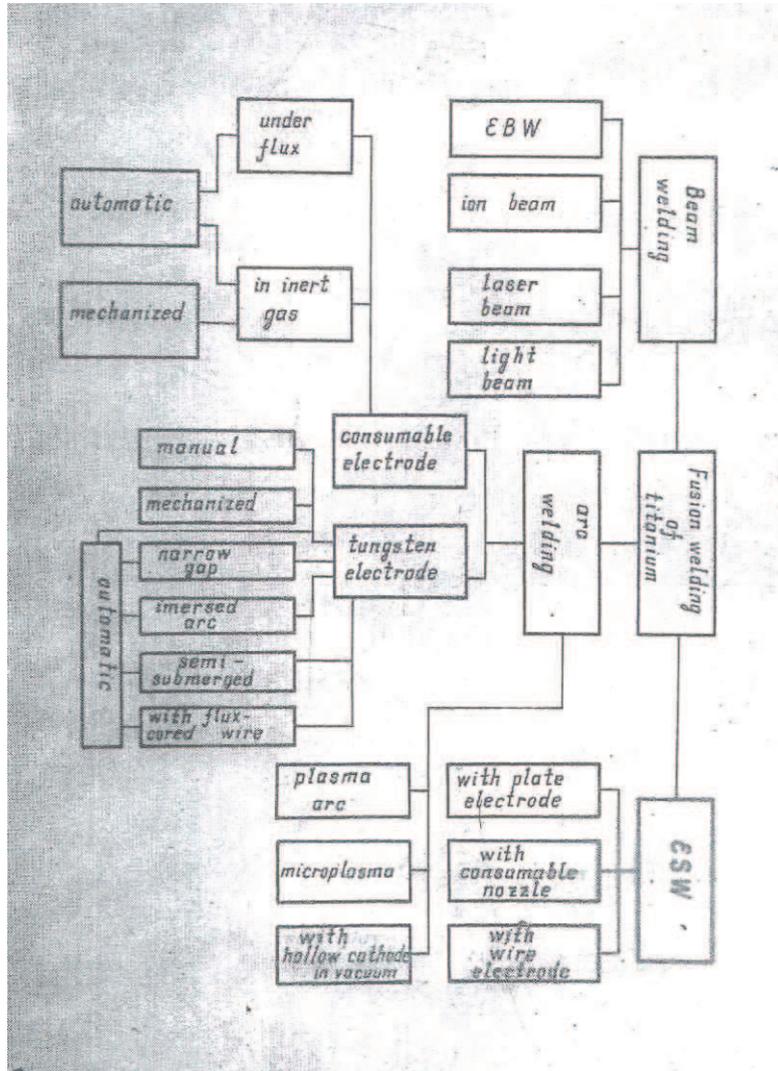


Fig.1

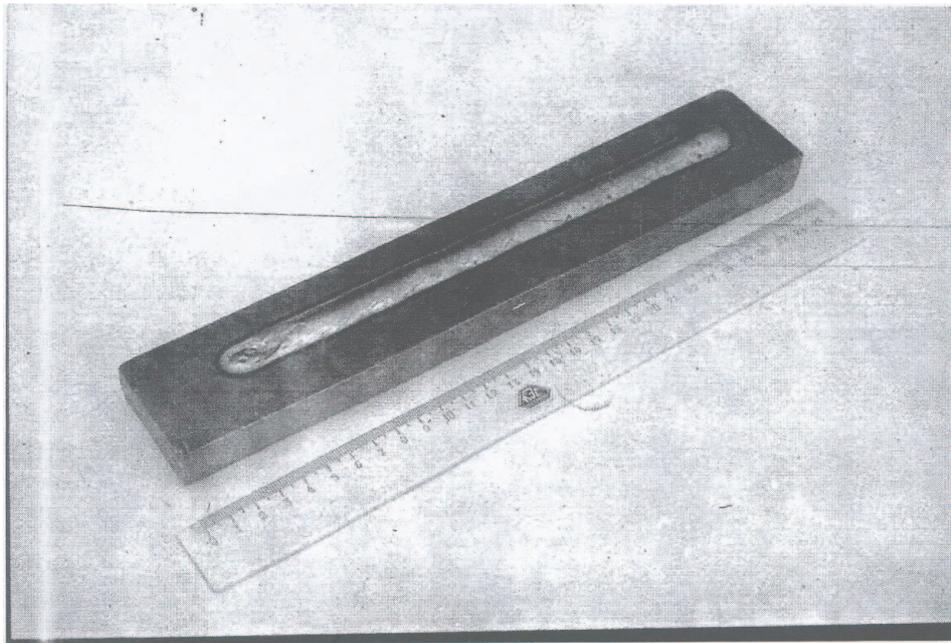


Fig.2

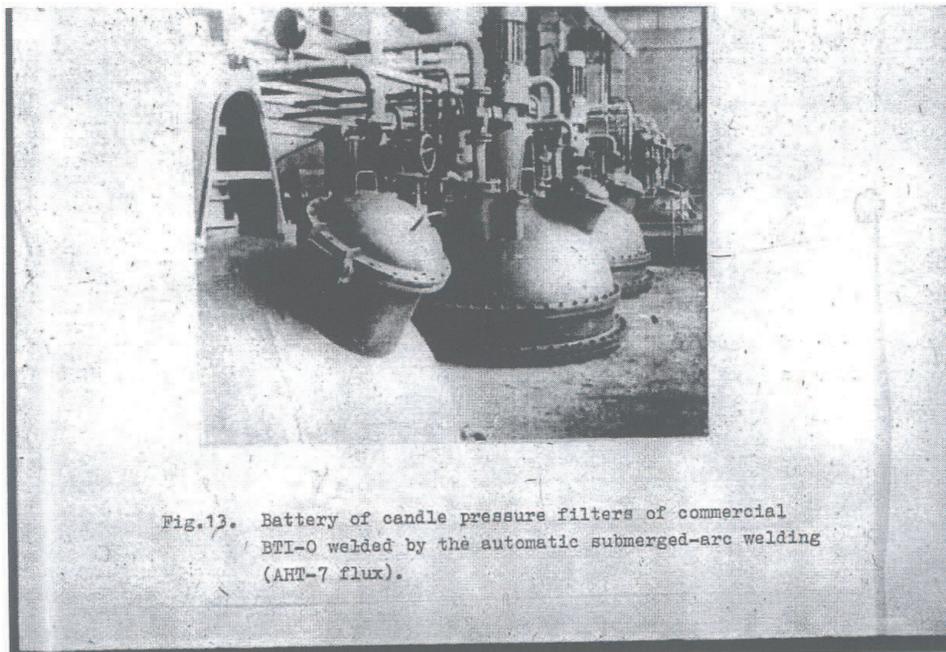


Fig.3

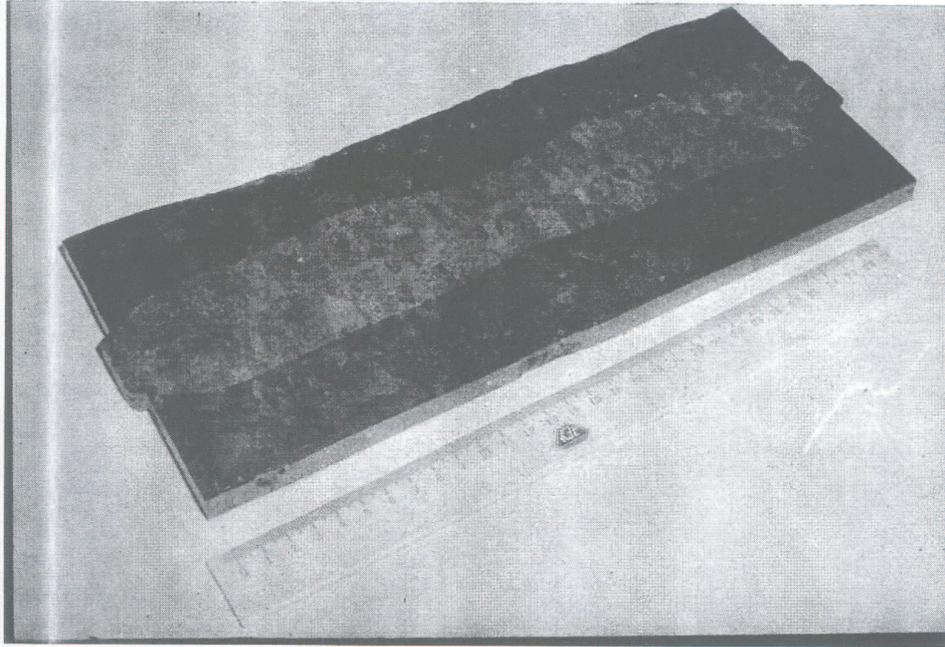


Fig.4

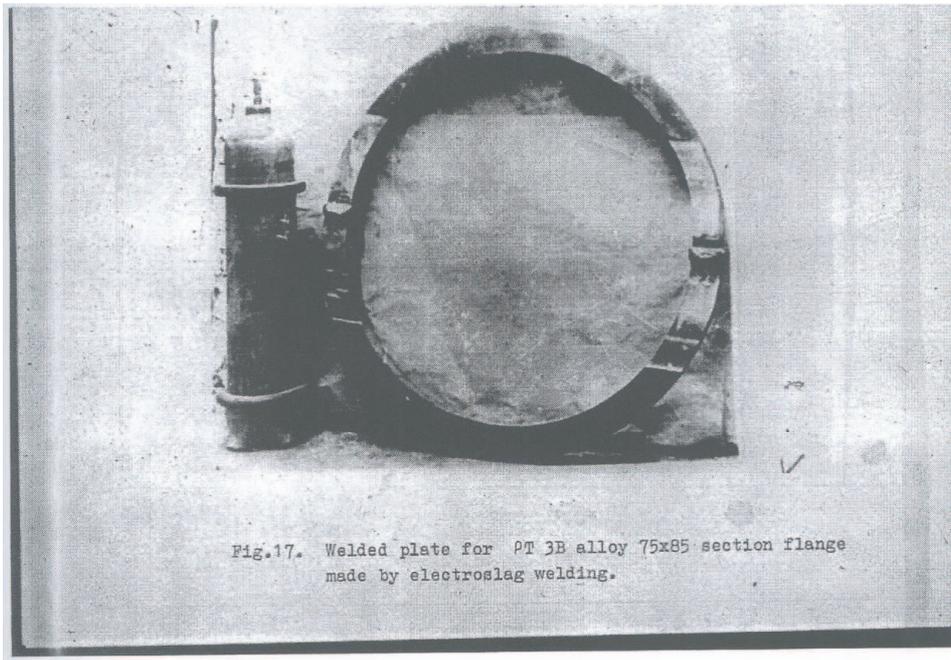


Fig.17. Welded plate for PT 3B alloy 75x85 section flange  
made by electroslag welding.

Fig.5

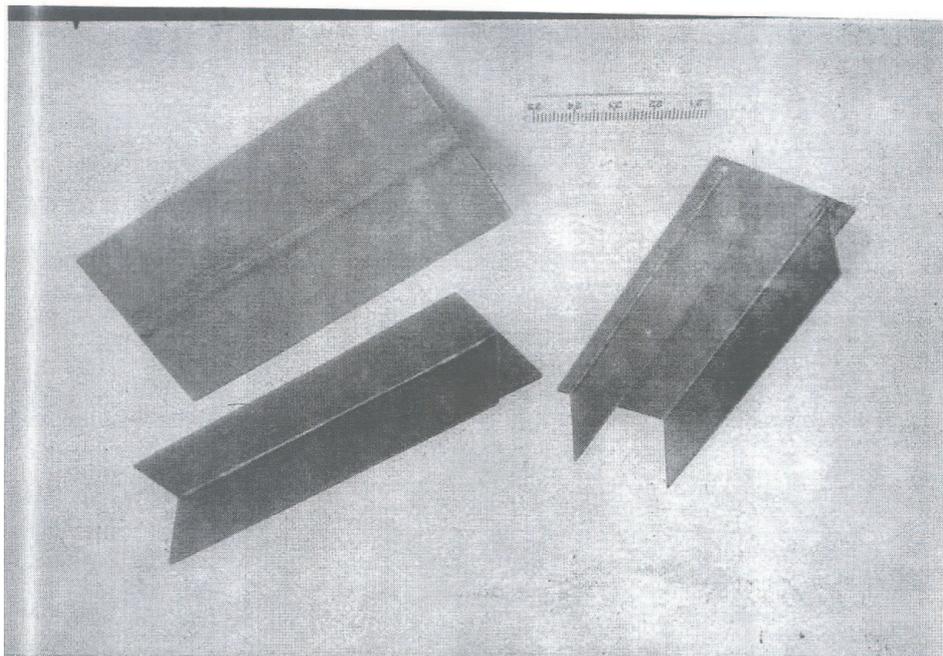


Fig.6

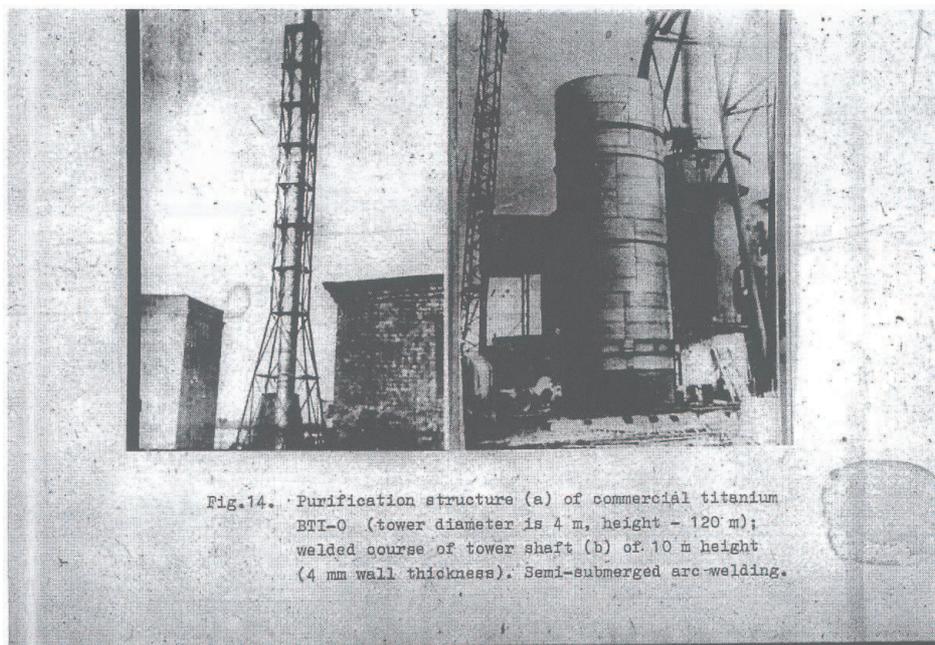


Fig.14. Purification structure (a) of commercial titanium BTI-0 (tower diameter is 4 m, height - 120 m); welded course of tower shaft (b) of 10 m height (4 mm wall thickness). Semi-submerged arc welding.

Fig.7

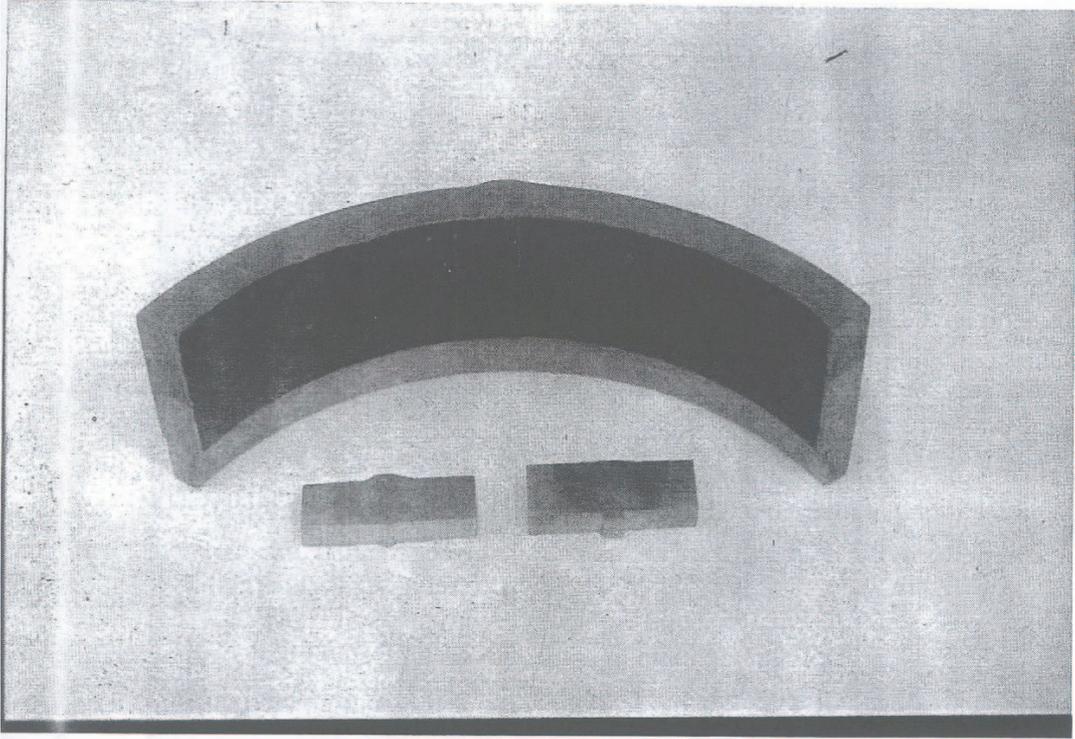


Fig.8

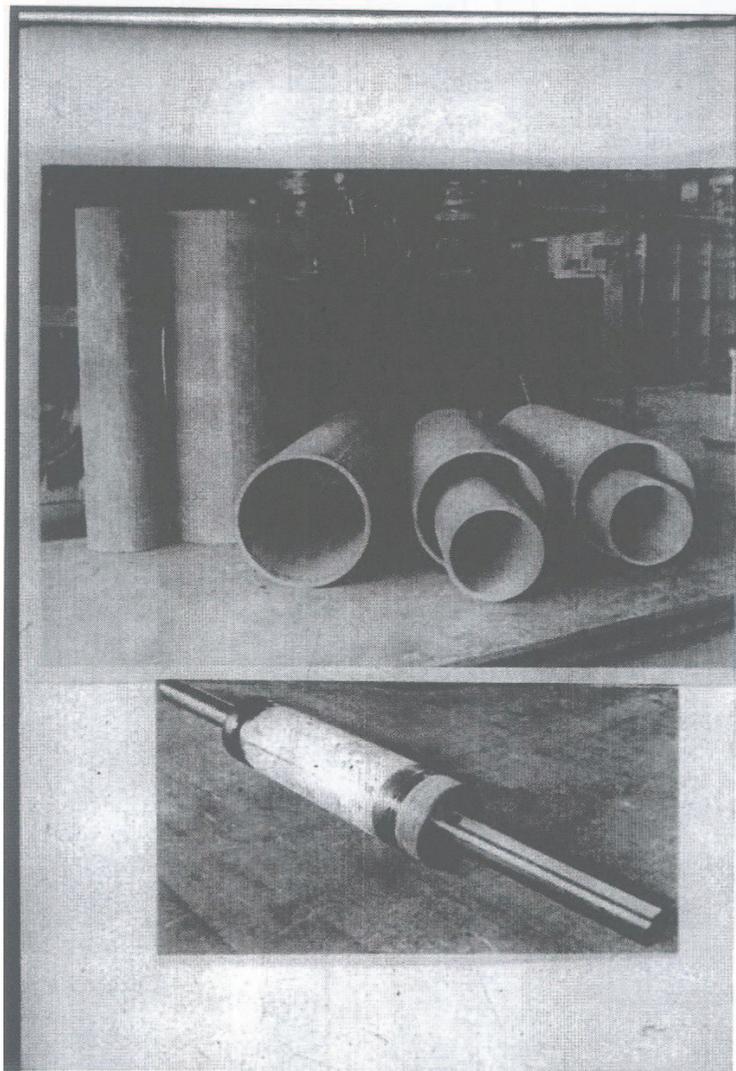


Fig.9

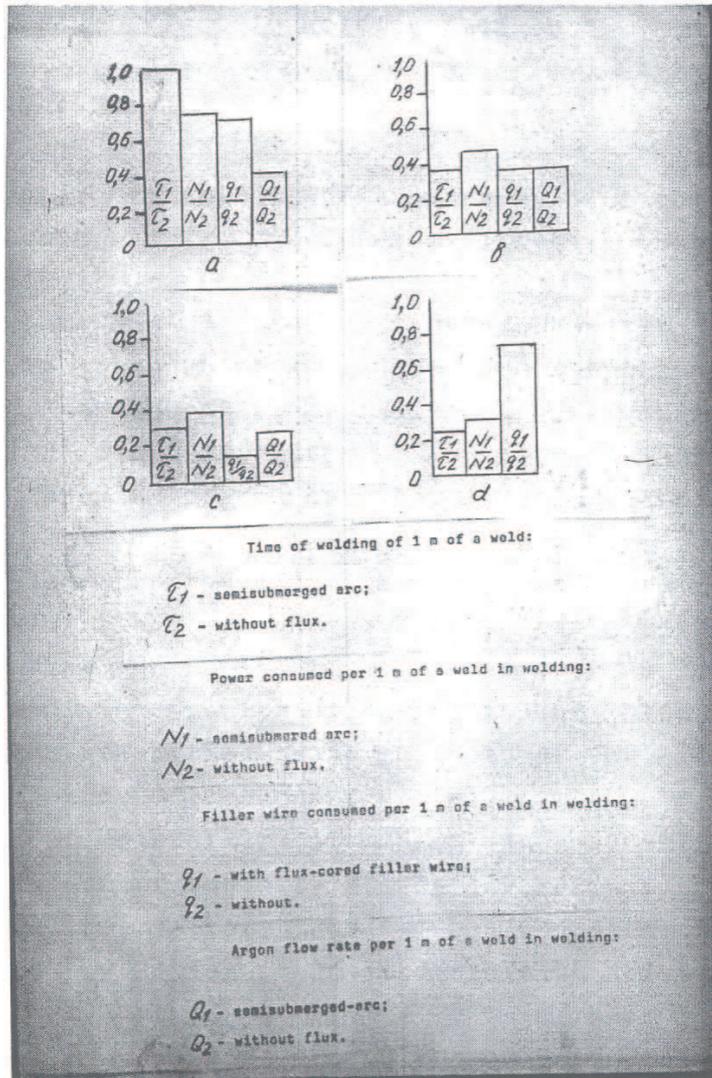


Fig.10

## METALLURGICAL AND TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF ARC WELDING OF THERMALLY STRENGTHENED TITANIUM ALLOYS

V. N. Zamkov, V. F. Topolskii , I. K. Tyapko

E.O. Paton Electric Welding Institute  
of the Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

As compared to welding of commercial titanium, welding of thermally-strengthened ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys is characterized with additional difficulties.

They are caused by peculiarities of phase transformations and structural changes of metal under the effect of welding thermal cycle and, consequently, by differences in thermal stability and kinetics of dissociation of metastable phases in the cast weld metal, the HAZ and the base metal in subsequent thermal strengthening.

The present paper will not dwell on physical implication and mechanisms of these processes, because the results of their detailed studies are published by many researchers. However, despite this fact, the problem of making welded joints in ( $\alpha+\beta$ ) alloys with the properties close to these of the alloys after strengthening heat-treatment remains actual.

Studies of weldability of medium- and high-alloy ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys conducted recently at the E.O.Paton Electric Welding Institute allow to formulate two basic statements without the consideration of which it is impossible to solve the above problem:

- optimum chemical composition of a weld does not usually correspond to chemical composition of base metal;
- heat-treatment conditions recommended for strengthening of ( $\alpha+\beta$ ) alloys are not suitable for welded joints in these alloys.

Concrete definition of these statements in welding of alloys Ti-6Al-4V, Ti-4.54Al-3Mo-1V, Ti-4.5Al-2Mo-4.5V-0.6Fe-0.6Cr, Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr allowed to create a versatile multi-alloyed welding titanium wire based on Ti-Al-Mo-V-Nb-Zr-Re system alloy. The wire has the SP15 grade. This wire used for welding of the above and some other titanium alloys provides the high performance of welded joints both after annealing and after

strengthening heat-treatment.

The results of mechanical tests of welded joints subjected to annealing after welding prove the fact that the SP15 wire used for welding provides welds equally strong to base metal and high impact toughness of cast weld metal.

It is a known fact that ductility and strength of  $(\alpha+\beta)$  alloys depend on the quantitative ratio and properties of  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases. The higher the difference in strength of the phases, the lower the ductility of an alloy. The soft enough base ( $\alpha$ -phase) and the high-alloy  $\beta$ - or  $\alpha''$ -phase form in hardened  $(\alpha+\beta)$  titanium alloys in ageing in the 420-500 °C temperature range.

After ageing at lower temperatures (290-380 °C) the extent of alloying  $\beta$ - and  $\alpha''$ -phase is much lower. It decreases the difference in the phase strengths and provides the more favourable (...) characteristics of metal.

On the basis of these data, the E.O.Paton Electric Welding Institute has developed diagrams and conditions for strengthening heat-treatment of  $(\alpha+\beta)$  titanium alloy welded structures. Mechanical characteristics (in static and dynamic testing) of welded joints made by using the SP15 wire are given in Table 2.

The results given evidence that at present the strength level (at satisfactory ductility and impact toughness) of welded joints in  $(\alpha+\beta)$  titanium alloys after strengthening heat-treatment is not less than 1100 MPa, i.e. 90 % of strength of the alloys proper. It is provided by the SP15 wire used in welding and by low-temperature ageing in thermal strengthening of welded structures.

Table 1.

MECHANICAL PROPERTIES OF AS-ANNEALED ( $\alpha+\beta$ ) TITANIUM ALLOYS  
WELDED JOINTS MADE BY USING THE SP15 WIRE

Alloy grade	Metal thickness, mm	Tensile strength of welded joint, MPa	Place of fracture of tensile specimens	Impact toughness of weld metal, J/cm <sup>2</sup>
BT6 Ti-6Al-4V	5.0	925-935	base metal	50-55
BT14 Ti-4.5Al-3Mo-1V	5.0 24.0	950-960 960-970	base metal base metal	50-60 45-55
BT23 Ti-4.5Al-2Mo-4.5V- 0.6Fe-0.6Cr	6.0 10.0 30.0	1000-1020 980-1000 950-970	base metal base metal weld metal	55-65 50-60 50-55
BT22 Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr	20.0	1000-1010	weld metal	80-90

Table 2.

MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS  
IN ( $\alpha+\beta$ ) TITANIUM ALLOYS  
AFTER STRENGTHENING HEAT TREATMENT

Alloy grade	Welded joint thermal strengthening conditions	Metal thickness, mm	Tensile strength, MPa	Weld metal impact toughness, J/cm <sup>2</sup>	Low-cycle fatigue, MPa	Fracture toughness, MPa/mm
BT6 Ti-6Al-4V	Water quenching from polymorphous transformation temperature (T <sub>pt</sub> )-(20-40) °C, ageing at 370 °C for 4h, air cooling	5	1150-1200	40-45	-	-
BT14 Ti-4.5Al-3Mo-1V	Water quenching from (T <sub>pt</sub> )-(20-40) °C, ageing: at 370 °C for 8h, air cooling: at 620 °C for 2.5h, air cooling	5 24	1150-1180 1120-1150	40-45 35-40	- -	- -
BT23 Ti-4.5Al-2Mo-4.5V-0.6Fe-0.6Cr	Air quenching from (T <sub>pt</sub> )-(20-40) °C, ageing: at 380 °C for 8h, at 550 °C for 2h, air cooling	6 10 30	1150-1180 1150-1170 1100-1120	40-45 45-50 40-45	- - =570 N>0.35E6 =735 N>1.5E6	- - 2800
BT22 Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr	Annealing at 830 °C for 2h. Cooling in furnace down to 600 °C for 1h, air cooling: ageing: at 380 °C for 8h, at 550 °C for 2h, air cooling	20	1100-1150	55-60	=600 N>0.4E6 =400 N>1.5E6	-

SEVENTH INTERNATIONAL MEETING ON TITANIUM  
GINATTA TORINO TITANIUM - TURIN, ITALY  
15th NOVEMBER, 1991  
-----

PAPER : OFFSHORE OIL & GAS MARKET - THE PROBLEMS OF SELLING  
TITANIUM

AUTHOR: R. G. PORTMAN - MANAGING DIRECTOR - BUNTING TITANIUM LTD

ABSTRACT: See attached

PAPER:

It is an interesting observation that since the mid 1970's approximately 170 oil and gas platforms have been built to operate in the North Sea area alone. During that time many lessons have been learnt by the operators to enable them to improve efficiencies to the point where now the Industry is utilising some automatic processing and sub-sea processing on a variety of different structures in deeper and deeper waters. The technology and the rate of growth is simply astonishing. How disappointing it is therefore not to be able to mirror that growth when examining the utilisation of Titanium into the Offshore Industry.

Only now in 1991 is Titanium beginning to develop momentum, not I have to say, led by the Titanium Industry but by the need of the Offshore Industry to use better materials with longer life guarantees. Belatedly the Titanium manufacturers are approaching the Offshore Industry with offers of materials, technical support and their interest. Where were they 15 years ago?

In the early days the Offshore Engineer, with no previous experience to relate to had to use conventional technology proven in refineries on land and which were available commercially. He also needed sufficient relevant information in engineering standards against which they could design. This led to the massive use of Carbon Steel with perhaps the only concession to the more difficult environment found offshore being the utilisation of coatings e.g. paints, cements etc.

The average American or British Engineer in the 1970's was trained academically and practically to deal with Carbon Steel (this is still largely the case today!). Most of the codes he would work with gave data only on steel, so it was perhaps no surprise that that was the material he or she turned to. Yet there were exceptions. Titanium plate heat exchangers have been used in top-side seawater cooling systems from the very first day. There was no problem for the Heat Exchanger manufacturers to sell their product to this conservative audience, yet elsewhere, either on top-side or sub-sea, Titanium was never considered. No one built on this successful Titanium application so the image of an 'exotic' high priced metal irrelevant to the Industry was fostered and allowed to grow.

Once the early production fields in the U.K. were up and running e.g. Shells Brent Field, BP Forties field etc., the realisation that the rates of corrosion were unacceptably high led to the introduction of Stainless Steels and Cupro Nickel alloys. By the late 1970's early 1980's both these materials were being regularly specified in process equipment where seawater was being handled.

The reaction of those material suppliers was positive and many thousand of tonnes were sold into the Offshore Industry. However, the continual problems of erosion, pitting, crevice corrosion etc soon made users realise that even these materials were not the long term answer to their problems.

With the growing cost of building Oil and Gas platforms and a somewhat erratic market for their product, the operators began to look for more consistency in process equipment and increasingly became aware of weight cost penalties, particularly for topside equipment.

At this stage and with the rapidly expanding Norwegian market the opportunity for the Titanium Industry to really 'attack' the offshore companies was never better. The Industry had years of good experience with power station condensers and had major process equipment working satisfactorily in the Chemical, Petrochemical and Nuclear Plants. The price of Titanium had stabilised after the major rise in the late 1970's and supply was generally good.

Unfortunately, the aerospace dominated Titanium manufacturers chose not to follow the trend in this market but to leave it to small specialist fabricating companies like my own to do their marketing development work for them. Instead the steel industry, realising the problems and learning from this began to develop a whole range of new improved stainless steels both austenitic and duplex such as Avesta's SMO254, Sandviks 2205 and Weirs Zeron 100. Each year during the mid to late 80's new 'super' grades were introduced by the major steel companies all proclaiming their suitability for corrosion resistance combined with strength and availability. By working closely with the fabrication industry they made moves to fully integrate the supply of all product forms and processes. Training courses for welding their material were provided and forgers and casters were encouraged to develop their skills and capacity to offer these grades. Distribution agreements were made with stockists backed by a strong marketing campaign.

The steel industry made sure their grades were submitted to the appropriate authorities for inclusion in International and National standards so there were no design constraints stopping the implementation of their material. They talked to the Offshore Industry about specific areas of possible utilisation and then provided full 'turnkey' budget costs so that a real financial evaluation could be made with a full understanding of the final installed cost rather than just material cost. They used trade association and technical seminars to promote their materials and industry. The result? ... Surprise, surprise massive sales by the thousand of tonnes. This for materials, often with no track record, very commonly just a variation on a theme and at cost

levels considerably higher than the previously used stainless and cupro nickel products. All this time Titanium had the better experience, better corrosion performance and with considerable weight benefits to offer but still the market perception was of high cost, low availability, poor fabricatability etc., etc.

Now, today more problems using Duplex steels are continuing to be discovered by the Offshore Industry. The steel industry is quickly introducing so called 'Super Duplex' grades on the 'Daz washes whiter' principal to hold on to their market share. They defend themselves against Titanium with old unrelated arguments based on their hope that the users ignorance of Titanium is still high. However, the user is now sceptical about them and wonders if the ideal material will ever evolve from them or will there always be some unsuspected limitation arising around the corner. This, once again, is Titanium's opportunity to exploit their nervousness and their concern and what better timing for us. The mills are hurting because the aerospace market has once again hit them badly and demand is currently very low. The military situation means less a future opportunity for Titanium and the introduction of other sources of supply i.e. USSR means that capacity levels at mills worldwide are operating at very low volumes. The net effect is that prices are low and Titanium can currently compete very effectively against the competitive materials.

With the Titanium manufacturers now despatching their salesmen all over the Offshore market and with them all proclaiming their long term intention to seriously develop the non-aerospace market, surely there is hope that at long last Titanium will take up its proper position as one of the major materials used Offshore? But wait, how is the Titanium industry doing? The answer is I'm afraid not too good. The approach is unco-ordinated, the infrastructure for dealing with success is not established. The personnel selling the materials are the same people who sell any grade of Titanium anywhere. No specialists are brought in, and no one talks to the market to understand the customers needs. Yes individuals are approached on specific projects but no one, or no one body, is overseeing where the opportunities are. In the U.K., the Titanium Information Group, of which we at Bunting are members, has made a start but by virtue of the membership and the intent of the association, this is on a small scale. Where are the Titanium seminars organised to attract end users not other Titanium people? Where are the approaches to the International authorities to get Titanium specified into working codes? Where are the marketing initiatives that bring Titanium to the forefront and to the attention of the end user?

What alloy development is being done to meet the growing sub-sea market requirements? Why is it that the only people I meet when operating in this market are those from small companies like ours, who with all the enthusiasm and expertise in the world cannot be perceived by the end user, often multi-internationals, as being capable of supporting a large scale capital investment project. Why is it on the Hibernia project, for instance, that for the topside seawater source pipe system, titanium was not even considered? Has anyone here studied how the Aluminium industry has so successfully penetrated the Offshore market in areas like

accommodation units and helipads ? They, like Titanium, started with many myths to overcome and a great deal of prejudice. Are we aware of the work being done to promote the use of glass reinforced plastics and carbon fibre materials and the whole range of composites ? Do these industries allow units like Shell Research to give up evaluating their materials for use in manifolds in favour of Duplex steels because they could not attract anyone's interest within the Industry to help them source pumps ? That actually happened several years ago with Titanium.

There is, I'm afraid, still a lot to do. My purpose in giving this paper is to address some of the home truths. We have in Titanium, a real and effective solution to many of the Offshore Industry problems. The potential is large, the challenge is fierce. If we are to succeed it will be as an Industry not as a collection of companies. It is, with respect, upto the major Titanium manufacturers to get their act together and give the smaller companies the lead and support we have so long waited for.

IL TITANIO E LE SUE LEGHE  
COME MATERIALE STRUTTURALE  
NELLE COSTRUZIONI NAVALI

Comunicazione al  
VII MEETING SUL TITANIO  
15 Novembre 1991

organizzato dalla  
GINATTA TORINO TITANIUM

di  
Alessandro Fabroni

Fabroni Engineering  
Milano -Firenze

Buongiorno, sono Alessandro Fabroni e da oltre 20 anni mi occupo di progettazione navale nel settore della cantieristica minore al quale dedico, unitamente al mio Gruppo (Fabroni Design e Fabroni Engineering) attenzione anche nello sviluppo di nuove tecnologie e di "nuovi" materiali.

## ABSTRACT

Nel mio intervento, maturato al seguito ad una positiva ed efficace collaborazione con la GINATTA TORINO TITANIUM, si intendono evidenziare le caratteristiche che rendono il Titanio ed alcune sue leghe un eccellente materiale strutturale per uso navale.

Si desidera, inoltre, evidenziare come una non corretta valutazione ed informazione sulla lavorabilità del materiale e del suo costo abbiano fino ad oggi limitato l'impiego del materiale, nel settore navale, a parti e componenti di limitata entità.

Si evidenzieranno le caratteristiche che un materiale strutturale deve avere per essere valido in tale tipo di costruzione.

Si daranno cenni sulle caratteristiche del titanio e delle leghe prese in considerazione ed i motivi di tale scelte.

Si daranno anche cenni sui sistemi di lavorazione del materiale, con specifico riferimento alla carpenteria navale.

Desideriamo dimostrare che una imbarcazione realizzata completamente in titanio risulta un'ottima unità con caratteristiche, sia riferite al peso, sia alla quasi totale assenza di manutenzione, sia all'affidabilità nel tempo che nessun altro materiale è in grado di offrire.

Desideriamo sottoporre alla Vostra attenzione che uno scafo in titanio conserva nel tempo il valore del capitale impiegato dal suo Armatore.

Desideriamo altresì sottolineare che una imbarcazione, con strutture e fasciami in titanio ha un costo uguale o di poco superiore ad una unità realizzata con materiali convenzionali.

Voglio ringraziare, in modo particolare il Dottor Ezio Debernardi, gli Ingegneri Luigi Varalda e Andrea Fogliarini della Ginatta Torino Titanium, nonché gli Ingegneri Giovanni Svava e Fulvio Grassi ed il Geometra Gabriele Caciotti, miei collaboratori, che hanno reso possibile questa mia comunicazione.

Ringraziamo altresì il Registro Italiano Navale, il Lloyd's Register of Shipping ed il Bureau Veritas che hanno attivamente collaborato a verificare le nostre ipotesi di calcolo strutturale.

## PREMESSA

Il comparto della cantieristica minore, quello della nautica da diporto e quello delle imbarcazioni per usi speciali, resta un comparto prevalentemente artigianale dove non è possibile, data la struttura tecnica e produttiva, in funzione dei numeri e del fatturato, svolgere una vera e propria attività di ricerca, sperimentazione e progettazione industriale.

Ciò nondimeno è possibile, anzi doveroso, data la premessa fatta, introdurre ed apportare tecnologie mediandole da altri settori produttivi, decisamente più evoluti, al fine di un miglioramento qualitativo del prodotto.

Questa esigenza: il miglioramento qualitativo, è soprattutto sentita dalla cantieristica italiana e da quella di altri paesi europei in quanto è nella qualità, e non nella quantità, che la cantieristica trova la propria ragione di essere ed è appetita dai più importanti mercati come gli Stati Uniti, il Giappone, il mondo arabo nei quali esiste una utenza con forte propensione all'acquisto di super boats.

La cantieristica nazionale, ove oltre il 70% del fatturato è rappresentato da questo tipo di produzione, prevalentemente destinato ai mercati esteri, ha fatto notevoli progressi in molti settori: da quello dell'impiantistica di bordo, a quello dei controlli elettronici dell'unità, alle finiture, allo studio ed ad una diversa e più attuale logica delle compartimentazioni, alle carene, ai sistemi propulsivi, al design.

Nomi notissimi nel campo della progettazione navale da Renato Sonny Levi a Fabio Buzzi, da Paolo Caliarì a Pierluigi Spadolini, da Andrea Vallicelli agli Sciomaken, nomi altrettanto noti della cantieristica da Riva ai Benetti, dai Cantieri di Pisa a i Sangermani, ai Mostes, alla CUV hanno portato nel mondo il così detto italian style, ove forme e contenuti tecnici sono un tutt'uno, invidiato dal mondo intero.

Solo nel campo dei materiali da costruzione, ove si voglia per un'istante dimenticare gli imponenti sforzi fatti dalla Tecnara nelle imbarcazioni da regata, sia a vela che a motore (i MORI DI VENEZIA ed il FERRETTI OFF-SHORE), richiesti per impieghi esasperati e troppo specialistici per avere un seguito più o meno immediato nella produzione, i passi avanti sono stati molto limitati.

Non solo: la nostra tecnologia del lamellare, dell'acciaio, delle leghe leggere è stata fatta propria da produttori di paesi emergenti che, data la loro struttura produttiva e i contenuti costi di manodopera, si presentano al mercato, dopo un periodo di adattamento, come agguerriti concorrenti.

L'inerzia mentale, l'adattamento al comune, di alcuni produttori e di alcuni progettisti ha aggravato questa situazione di stallo.

Fatte queste premesse che portano alla conclusione che sia necessario ed indispensabile uno sviluppo tecnologico nel settore dei materiali da costruzione, se un certo tipo di cantieristica vorrà sopravvivere e riproporsi come leader nei mercati mondiali, occorre traslare da altri settori materiali e tecnologie, che già offrono una consolidata sperimentazione ed impostazione tecnico produttiva, pur con i neces-

sari adeguamenti allo specifico settore della cantieristica minore.

Le esperienze del nostro Gruppo di progettazione e sviluppo del prodotto, maturate in questi ultimi anni, grazie anche alla attiva collaborazione della GINATTA TORINO TITANIUM, ed alle tavole di studio organizzate nel settembre 91 dalla stessa GTT con la collaborazione del nostro Gruppo, ci portano inequivocabilmente ad indicare il titanio ed alcune sue leghe come il materiale in grado di dare una svolta in positivo ed un deciso miglioramento qualitativo nelle costruzioni navali.

Desidero pubblicamente ringraziare il nostro ospite la Ginatta Torino Titanium, non solo a nome personale, ma di tutta la cantieristica minore, per la sensibilità che, quale importante azienda mondiale nel settore del titanio, ha mostrato nei confronti di un comparto produttivo, che, aimè, come detto, non ha una propria potenzialità per avvicinarsi a nuove tecnologie, e qualche volta, purtroppo, manca anche di stimoli sufficienti nell'andarle a ricercare.

## INTRODUZIONE

Il titanio ha avuto in passato una larga diffusione nel settore aerospaziale a causa della sua eccellente combinazione di caratteristiche meccaniche/densità, resistenza a fatica, ed eccezionale resistenza a tutte le forme di corrosione, sia chimica che galvanica, nonché alla sua amagneticità ed all'assenza di fenomeni di cavitazione.

Oltre l'impiego aerospaziale, il titanio si è dimostrato estremamente versatile negli impieghi industriali colmando "la breccia di progettazione" che esiste tra le leghe leggere di alluminio e gli acciai.

Il suo utilizzo si fa sempre più ampio in tutti i settori industriali, da quello meccanico, al chimico, all'edilizia e, non ultimo, il medico chirurgico.

L'ignoranza delle caratteristiche del materiale, delle sue tecnologie e delle sue lavorazioni, oltre la preconcepita valutazione di elevati costi di acquisto e di lavorazione ha portato ad un generalizzato disinteresse verso il Titanio, anche da parte di quegli organi di classifica, i Registri Navali, che istituzionalmente sono chiamati a redigere i regolamenti di costruzione e ad approvare e sorvegliare le medesime.

Nel settore navale il titanio ha fino ad oggi trovato scarsissime applicazioni se non in particolari e componenti secondari, di scarso rilievo, se si esclude "impiego nei sommergibili russi di ultima generazione ed alcune esperienze americane in mezzi da sbarco dove il materiale era impiegato essenzialmente come protezione balistica.

In Italia solo grazie all'iniziativa della GTT e del nostro Gruppo si è recentemente iniziato a svolgere un'azione di promozione tecnica, di ricerca specifica e di adeguamento alle metodologie di costruzione, nel settore, che ha già portato ai primi risultati coinvolgendo i più qualificati ed importanti Registri di Classifica in una valutazione regolamentare del materiale.

Il primo anello è quindi spezzato e già posso affermare che il Registro Navale Italiano, il Lloyd's Register of Shipping ed il Bureau Veritas sono disponibili ad esaminare

costruzioni in titanio ed alcune sue leghe sia con calcolo diretto, ma anche sulla base di uno studio di un procedimento di calcolo per redatto pre analogia con altri materiali metallici.

Questo studio, del quale la presente comunicazione ne riporta gli elementi essenziali, dopo un'attenta analisi relativa alle caratteristiche del materiale e delle possibilità di lavorazione, specificatamente riferite al nostro campo di impiego e di utilizzo, ci ha posto nella convinzione che il titanio sia un materiale eccezionale sotto un punto di vista tecnico e praticamente concorrenziale anche nei costi per imbarcazioni di elevate caratteristiche e di prestigio, destinate a durare nel tempo.

## CENNI SULLE CARATTERISTICHE RICHIESTE DA UNA COSTRUZIONE NAVALE

Vorrei sottoporre alla Vostra attenzione le principali caratteristiche che sono richieste ad una costruzione navale per poi rapportarle a quelle del materiale da noi preso in considerazione.

- A) DURATA NEL TEMPO DELLA COSTRUZIONE
- B) ASSENZA E/O SCARSITA' DI MANUTENZIONE
- C) MANCANZA DI FENOMENI DI CORROSIONE ED OSMOSI
- D) PESO
- E) CARATTERISTICHE ACCESSORIE
- F) VALIDITA' DEL COSTO DI COSTRUZIONE

### **A) Durata nel tempo della costruzione.**

Una unità sia da diporto, che destinata ad usi speciali (pattugliamento, soccorso, antincendio, ricerca, Etc.) ha un alto valore globale pertanto la sua utilizzazione nel tempo deve essere la più lunga possibile onde ammortizzare in maniera efficace l'impegno economico che questa ha richiesto.

Lo scafo, i ponti e le sovrastrutture hanno un costo percentuale relativamente basso rispetto agli altri componenti, ciò non di meno una non adeguata durata nel tempo di tale, fondamentale, componente compromette in modo pressoché irrecuperabile la restante, preponderante, parte della costruzione o comunque implica costi di ripristino elevatissimi.

E' una delle caratteristiche fondamentali di uno scafo (fasciami e strutture) che la sua durata garantisca gli alti investimenti della intera costruzione.

Un esempio di ciò può essere fornito da una unità da diporto di 27 metri realizzata

circa venti anni or sono in acciaio dove la maggior parte dei componenti, impianti, arredi, motori era sostanzialmente valida ed efficiente, ma dove una parte (circa il 30%) dei fasciami dovevano essere sostituiti per il loro stato di corrosione.

Questa operazione ha comportato un fermo dell'unità di oltre 8 mesi, ma, sopra tutto, lo smontaggio e smantellamento di tutti i principali componenti, compreso gran parte degli alloggi, il cui costo di reinstallazione e ripristino è ben superiore al puro costo della sostituzione dei fasciami avariati.

Si può pertanto concludere, che là dove esista un materiale che non presenti tale inconveniente il valore intrinseco dell'unità è molto superiore, a prescindere dal costo di costruzione.

## **B) Assenza e/o scarsità di manutenzione.**

L'assenza o la scarsità di manutenzione influiscono su due sfere distinte di valutazione.

- costi di manutenzione,
- oneri del fermo barca.

Con i materiali strutturali solitamente fino ad oggi impiegati, sia che si tratti di legno, con le sue variate tecnologie, sia che si tratti di acciaio o leghe leggere di alluminio, ma anche di vetroresina o di compositi esiste una costante: a più o meno brevi intervalli di tempo occorre che le strutture ed i fasciami siano protetti generalmente, con procedimenti particolari, solitamente da vernici di vario genere:

Questa operazione, mentre nei fasciami esterni comporta solo l'onere economico di un ripristino per la loro facile accessibilità, è estremamente complessa per quanto riguarda i fasciami interni e le strutture, spesso difficilmente accessibili od accessibili previo smontaggio e rimozione di molti componenti.

L'altro aspetto, riferito con maggiore interesse alle unità per usi speciali e quindi da lavoro, ma anche sulle unità da diporto, riguarda i tempi e la frequenza di manutenzione che incidono in maniera rilevante sulle valutazioni economiche di gestione di un'unità.

I periodi di fermo per manutenzione incidono pesantemente sulla redditività e sulla fruibilità del natante.

Tale valutazione, spesso non considerata nel diporto, dovrebbe destare comunque un certo interesse in quanto i tempi di nolo dello scalo hanno costi molto elevati.

## **C) Mancanza di fenomeni di corrosione ed osmosi.**

L'assenza di fenomeni di corrosione, nel caso dei metalli, od osmosi, nel caso della vetroresina, o teredini e marcescenza, nel caso del legno, rappresenta un fattore riconducibile ai due succitati punti, ma rappresenta anche un elemento di sicurezza passiva che non può non essere preso in considerazione.

E' noto che l'ambiente marino è estremamente aggressivo sia per aspetti elettro-galvanici che chimici e fisici.

La assenza di tale problema pone il materiale che non è soggetto a tale situazione in una condizione ottimale e quindi preferenziale rispetto agli altri, anche sotto il profilo della sicurezza.

Nel caso di unità da diporto questo fenomeno ha assunto una rilevanza tutta particolare in quanto tali tipi di unità hanno lunghi periodi di stazionamento in porto, periodi che favoriscono i fenomeni di corrosione sia chimica che galvanica.

## **D) Peso.**

In un materiale strutturale le sue caratteristiche meccaniche in rapporto al peso specifico diventano un elemento qualificante in qualsiasi tipo di costruzione navale, in modo particolare quando si parla di unità veloci del tipo planante dove il conseguimento delle prestazioni è in gran parte demandato alla leggerezza dell'insieme.

Materiali come l'acciaio, con caratteristiche meccaniche eccellenti, trovano un limite nel peso specifico del materiale, quasi triplo rispetto alle leghe leggere e doppio rispetto al titanio.

## **E) Caratteristiche accessorie.**

Al di là di quanto fino ad ora, sommariamente esaminato, molteplici sono le caratteristiche che un materiale può offrire, rispetto ad altri, nell'utilizzo navale; esaminiamone alcune.

Elementi positivi sono, senza dubbio, il fatto di essere amagnetico, di avere una temperatura di fusione molto elevata, di avere una scarsa conducibilità termica, di avere scarsa conducibilità alla propagazione dei rumori e delle vibrazioni, lo stesso modulo elastico, che per certi aspetti dell'ingegneria navale rappresenta un limite a livello strutturale, può essere elemento positivo se valutato nel caso di piccoli urti accidentali.

La stessa presenza superficiale del materiale può essere ulteriore elemento di caratterizzazione e di diversificazione.

## **F) Validità del costo di costruzione.**

La valutazione che comunque resta determinante nelle scelte è pur sempre una valutazione economica relativa alla costruzione:

Occorre esaminare a fondo il problema e non limitarsi ad una indagine superficiale del semplice e puro costo del materiale e della sua lavorazione come successivamente esamineremo in modo dettagliato.

### **CENNI SULLE CARATTERISTICHE DEL TITANIO E DELLE LEGHE SPECIFICAMENTE VALUTATE PER L'IMPIEGO NAVALE**

Tutti voi essendo esperti e specialisti in questo settore conoscete le caratteristiche del Titanio e ci sembra inutile soffermarci specificatamente su tale argomento, oltretutto esistendo una letteratura sufficientemente estesa.

Quanto precedentemente detto, relativamente alle esigenze richieste da una costruzione navale, si adatta specificatamente al nostro materiale: resistenza alla corrosione, resistenza a fatica, resistenza meccanica-densità, amagneticità, scagittazione, sono un insieme di caratteristiche che nessun altro materiale, impiegato fino ad oggi nelle costruzioni navali, ha.

Il gruppo di studio di cui abbiamo fatto parte ha valutato per il momento i seguenti tipi di materiale:

#### **TABELLA 1**

- Ti CP 2            grado 2
- Ti CP 3            grado 3
- Ti CP 4            grado 4

ed alcuni tipi di leghe:

- Ti 6Al 4V            grado 5
- Ti 5Al 2.5Sn        grado 6
- Ti 3Al 2.5V        grado 9

Riportiamo pertanto le proprietà meccaniche di tali materiali che ci sarà utile valutare

in funzione delle successive tabelle di calcolo strutturale proposte in appendice.

La scelta su questi tipi è dovuta essenzialmente alla reperibilità commerciale ed alla facilità di saldatura, nonché al contenuto costo attuale di tali tipi di titanio e di sue leghe.

TABELLA 2

LIMITE A ROTTURA (MPa)

	Normative ufficiali			Produttori							Metal Handbook	
	ASTM	DIN	MIL	CEZUS	TIMET	RMI	SANDWIK	ILM	IMI	MEDIO	MINIMO	
Grado 1	≥240	290÷410	-	290÷410	≥240	≥275	-	≥275	290÷420	-	240	
Grado 2	≥345	390÷540	≥345	390÷540	≥345	≥345	-	≥345	390÷540	-	340	
Grado 3	≥450	460÷590	≥450	-	≥450	≥450	-	≥448	460÷620	550	450	
Grado 4	≥550	540÷740	≥552	540÷730	≥552	≥552	≥550	≥550	570÷730	620÷630	550	
5A1-2, 5Sn	≥830	≥785	≥687	≥790	≥830	≥830	-	≥790	≥790	860	790	
3A1-2, 5V	≥620	-	≥620	-	≥620	≥620	≥620	-	-	655÷700	-	
6A1-4V	≥895	≥895	≥922	≥900	≥895	≥895	≥920	≥885	≥895	1000	895	

TABELLA 3

Allungamento % su provetta 50 mm (2 inch)

	Normative ufficiali			Produttori					Metal Handbook	
	ASTM	DIN	MIL	TIMET	RMI	SANDVIK	ILM	IMI	MEDIE	MINIME
Grado 1	≥ 24	≥ 30	-	≥ 25	≥ 25	-	≥ 25	≥ 25	-	24
Grado 2	≥ 20	≥ 22	≥ 20	≥ 22	≥ 22	-	≥ 20	≥ 20	-	20
Grado 3	≥ 18	≥ 18	≥ 18	≥ 18	≥ 20	-	≥ 18	≥ 16	25	18
Grado 4	≥ 15	≥ 16	≥ 15	≥ 15	≥ 15	-	≥ 15	≥ 16	20	15
5A1-2,5 Sn	≥ 10	≥ 8	≥ 10	≥ 10	≥ 10	-	≥ 10	≥ 9	15	10
3A1-2,5V	≥ 15	-	-	-	≥ 15	15	-	-	25÷30	15
6A1-4V	≥ 10	≥ 14	≥ 15	≥ 14	≥ 14	-	≥ 10	≥ 8	-	10

TABELLA 4

Limite di snervamento allo 0,2% di allungamento residuo (MPa)

	Normative ufficiali				Produttori							Metal Handbook	
	ASTM	DIN	MIL.		CESUZ	TIMET	RMI	SANDVIK	ILM	IMI	MEDIE	MINIME	
Grado 1	170÷310	≥ 180	-		≥ 195	≥ 170	≥ 210	-	-	≥ 200	-	172	
Grado 2	275÷450	≥ 250	275÷450		≥ 275	≥ 275	≥ 275	-	≥ 275	≥ 290	-	276	
Grado 3	380÷550	≥ 320	380÷550		-	≥ 380	≥ 380	-	≥ 375	≥ 340	-	380	
Grado 4	485÷655	≥ 390	485÷655		≥ 440	≥ 485	≥ 485	≥ 480	≥ 476	≥ 460	550	480	
5A1-2, 5Sn	≥ 795	≥ 755	≥ 775		≥ 760	≥ 775	≥ 785	-	≥ 760	≥ 760	820	795	
3A1-2, 5V	≥ 485	-	≥ 485		-	≥ 482	≥ 517	≥ 517	-	-	560÷600	-	
6A1-4V	≥ 830	≥ 830	≥ 830		≥ 830	≥ 830	≥ 830	≥ 870	≥ 830	≥ 830	900	830	

## CENNI SUI TIPI DI LAVORAZIONE DEL TITANIO

Anche sulla lavorazione del Titanio esiste una letteratura sufficientemente estesa che voi tutti ben conoscete, merita comunque ricordare che la lavorazione del Titanio e delle sue leghe, nelle costruzioni navali, implica da parte dell'esecutore una conoscenza attenta dei parametri di lavorazione, conoscenze peraltro, facilmente acquisibili e che non implicano macchinari e tecnologie di alto livello, a differenza dell'industria aeronautica dove sono richiesti tipi di lavorazione di altissima precisione e l'utilizzo di speciali leghe che rendono queste operazioni particolarmente complesse.

Nel settore navale, cioè quello della grande carpenteria metallica, le lavorazioni richieste sono estremamente diverse ed implicano un Know how relativamente semplice, non più complesso di quello delle leghe leggere.

Tali metodi non sono però conosciuti dalla stragrande maggioranza delle cantieristica che ritiene, in modo preconcepito, particolarmente difficoltose le lavorazioni del Titanio riferendosi, generalmente, alla esecuzione di componenti aeronautiche o di altissima precisione.

Per questo occorre che si formi anche nella cantieristica una "cultura del Titanio".

In modo specifico occorrerà prendere atto che il sistema più diffuso di giunzione è quello per saldatura.

Questo per le leghe prese da noi in considerazione, come tutti sapete, richiede unicamente, oltre alla pulizia dei lembi, la protezione con gas della zona portata in temperatura durante la saldatura.

Occorre semplicemente mettere a punto un tipo di procedimento che meglio si adatti ai manufatti navali.

## VALUTAZIONI DEFINITIVE SUI COSTI

E' sul costo di un imbarcazione realizzata in Titanio che desideriamo sottolineare e fare delle considerazioni riepilogative e definitive.

Il costo è un elemento determinante per costruzioni da posizionarsi in un mercato estremamente aggressivo e concorrenziale; per una valutazione economica globale occorre tenere presenti tre aspetti:

- costo di costruzione dello scafo
- costi generali di costruzione rapportati alle caratteristiche specifiche del materiale

- costi di gestione e manutenzione

## **COSTI DI COSTRUZIONE DELLO SCAFO**

Proprio il costo del materiale e gli alti costi di lavorazione sono stati, come predetto, uno degli elementi, che, erroneamente valutati, hanno maggiormente impedito l'utilizzo del Titanio e delle sue leghe.

Va ricordato inoltre che una crescente offerta del materiale, unita mente a migliorati e più razionali metodi di produzione (vedasi il procedimento GINATTA), in questi ultimi anni ne a diminuito, e la tendenza si prevede sia costante anche in futuro, il costo.

A tale proposito merita porre all'attenzione dei cantieri la recente costituzione della TITANIA (Gruppo ILVA) primo produttore nazionale di semilavorati in Titanio.

Abbiamo evidenziato che il mercato, riferito alla produzione nazionale ed Europea al momento richiede, e più ancora in futuro richiederà un buon numero di "super yachts" ed unità per usi speciali, imbarcazioni da 30, 35, 40 ed anche 50 nodi in misure comprese tra i 20, 30, ed anche 40 metri.

Queste sono imbarcazioni generalmente realizzate all'unita, od in serie limitatissima, e rappresentano una delle più alte espressioni tecniche nel settore navale.

Attualmente questo tipo di unità viene realizzato od in leghe di alluminio, specificatamente AA 5083 o AA 5086, e più raramente in compositi di tipo non avanzato.

Quella dei "super yachts" ed unità per usi speciali è una fetta importante del mercato che si rivolge ad una utenza, sia privata che pubblica, competente esigente che ricerca in una imbarcazione caratteristiche tecniche di eccellenza.

Tutto ciò premesso occorre fare una valutazione di quanto incide, in tale tipo di imbarcazioni, il costo dello scafo e delle sovrastrutture rispetto a tutti gli altri componenti.

La parte propulsiva richiede potenti e leggeri motori diesel, poco rumorosi, con modeste vibrazioni, affidabili, macchine generalmente sofisticate, progettate e realizzate specificata mente per un impiego marino, quindi in serie limitate, il cui costo è molto elevato, quando addirittura non si utilizzino delle turbine.

Lo stessi dica si per le trasmissioni che vedono un'applicazione sempre più frequente di complessi con eliche di superficie o con idrogetto.

Il valore di questi sistemi compreso lo studio e la loro corretta installazione a bordo può essere valutato tra il 25 e il 30 % del valore complessivo.

Anche l'impiantistica in questo tipo di unità riveste un ruolo determinante, sia per problemi connessi alla sicurezza, sia per l'affidabilità, nonché per offrire un miglior comfort all'utilizzatore.

Al di là degli impianti considerati strettamente connessi all'efficienza dell'imbarcazione: impianto elettrico, impianto di esaurimento sentine, impianto prevenzione ed estinzione incendi, ecc.. sono presenti a bordo impianti tendenti a migliorare la qualità della stessa vita di bordo; dal condizionamento alla desalinizzazione dell'acqua di mare, della refrigerazione cibi, ai più semplici, ma per questo non meno costosi impianti di diffusione musica e ricezione TV.

Tutta questa serie di problematiche, ormai divenute elemento essenziale in una moderna unità, implicano percentualmente un costo, sul complesso, particolarmente elevato che si aggira tra il 20 ed il 25 %.

Un ulteriore elemento determinante nella costruzione di imbarcazioni da diporto sono: gli arredi ed il loro grado di finitura.

Tutto ciò comporta una valutazione del 25 -30 % sul valore dell'opera, quando questo valore, per specifica richiesta, non aumenti, in modo percentuale a valori assai più elevati.

La componentistica elettronica, può essere suddivisa in tre gruppi. Quella strettamente legata alla navigazione (radar, scandagli, sistemi di navigazione, sistemi meteorologici, ecc.), settore che in questi ultimi anni ha subito una evoluzione, e quindi un aumento di costi decisamente sorprendente. Quella dei metodi di controllo dell'unità e dei suoi apparati, basata su sofisticati sistemi computerizzati. Quella dei sistemi di comunicazione, tenuti in grande conto dagli Armatori di questo tipo di unità. Non solo si parla di sistemi di radiotelefonia sempre più complessi, ma anche di sistemi telex e fax in collegamento con apparati satellitari.

Una valutazione percentuale approssimativa, là dove non vengano richieste particolari sofisticazioni, può essere indicata tra il 5 -10 %.

Infine va considerato l'armamento marinaresco di una imbarcazione; tutto ciò comprende quel gruppo di apparati che vanno dall'ormeggio alla funzionalità e fruibilità dei mezzi di contatto ed ai sistemi ed apparati di sicurezza passivi.

Anche questi incidono in modo rilevante che può essere valutato percentualmente tra il 5 ed il 10 %.

Mediamente, e può a prima vista parere un assurdo, la parte strutturale (fasciami e strutture) di una imbarcazione da diporto non supera il 15 - 20 % del suo valore totale e quindi l'incidenza del costo del materiale strutturale non incide in modo pesante o determinante sul valore finale.

Questa percentuale diviene ancora inferiore nelle unità più prestigiose, come i fast yachts, dove le prestazioni richieste sono molto elevate (costo dei gruppi motori propulsione), ma non di meno incidono l'impiantistica e l'elettronica di bordo nonché il tipo di finitura di decisa eccellenza (in queste l'armamento e l'allestimento influiscono fino al 90 %).

Desideriamo riepilogare, nella sotto riportata tabella, le percentuali di incidenza dei costi, in base alle nostre esperienze, che debbono essere interpolati tra loro, dei

singoli gruppi che compongono il tipo di unità che meglio si presta per l'utilizzo del titanio e di alcune sue leghe come materiale strutturale.

## TABELLA 5

Scafo e sovrastrutture	15 / 20 %
Motori e propulsioni	25 / 30 %
Impiantistica	15 / 20 %
Arredi e loro finiture	25 / 30 %
Elettronici	5 / 10 %
Armamento	5 / 10 %

Questa analisi, dettata dalle esperienze di molte costruzioni, porta a concludere che, anche qualora il costo del manufatto strutturale, fasciami e strutture, fosse anche doppio di uno analogo in leghe leggere, il valore finale dell'unità risulterà più alto solo di un 10 -15 %.

Ma un'altra considerazione, che definiremo essenziale in funzione delle caratteristiche del materiale, relativa al costo del manufatto, balzerà agli occhi appena si approfondirà il problema strutturale.

A parità di caratteristiche una unità in titanio (già con il GRADO 2), mediamente, verrà a pesare circa un 10 % in meno di una in leghe leggere, e più grande sarà tale unità, maggiore sarà tale percentuale, fino a giungere a valori del 20 %.

E inoltre saranno utilizzati Gradi più elevati il peso globale verrà ridotto in modo sensibile come evidenziato in appendice.

Da quanto esposto ne consegue che se il costo finale di un tale tipo di unità, come fino ad oggi realizzata in leghe leggere di alluminio, può essere indicata in un valore 1000; un analogo tipo di unità realizzata in titanio non supera il valore di 1150.

A ciò va aggiunto un altro tipo di considerazione, estremamente importante: là dove noi riusciremo a contenere i pesi e richiesta, a parità di prestazioni, un'applicazione di potenza inferiore e quindi una diminuzione dei costi dell'apparato propulsivo.

## **COSTI GENERALI DI COSTRUZIONE**

Nella costruzione di una imbarcazione vi sono molte componenti che possono variare in rapporto alle caratteristiche del materiale di costruzione impiegato: dalla verniciatura, a certi tipi di protezione, all'isolamento termoacustico, ecc..

Nel caso del titanio saranno particolarmente contenuti tutti i costi relativi alla verniciatura ed alle protezioni tramite verniciatura.

Sostanzialmente l'unica verniciatura richiesta, dovuta ad un fatto estetico, è quella dell'opera morta e delle sovrastrutture in quanto risultano completamente inutili le vernici protettive all'interno dello scafo nei fasciami e nelle strutture.

Questa operazione solitamente richiede materiali specifici di elevato costo e tempi di esecuzione elevati oltreché risultare un lavoro non salubre per l'operatore.

Il fatto inoltre che le costruzioni in titanio non richiedano vernici antivegetative riduce ulteriormente il costo globale della costruzione, sia per il materiale antivegetativo da apportare sia per i precedenti primer.

Anche nel settore dell'isolamento, sia termico che acustico, le unità realizzate in titanio anno minore necessità di tale tipo di protezione che si traduce in minori costi di materiali e manodopera.

Non saranno altresì più necessarie le protezioni galvaniche ed il loro impianto.

Quanto esposto porta ad una riduzione globale di costi di una certa valenza.

### **COSTI DI GESTIONE E MANUTENZIONE**

Ma la più importante valutazione "dei costi" di una imbarcazione realizzata in titanio è il quasi completo abbattimento delle spese di gestione e di manutenzione sia ordinaria che straordinaria.

Questa voce è spesso trascurata in una valutazione complessiva di una imbarcazione, ma rappresenta, nella sua gestione, una delle voci predominanti e quindi un elemento discriminante.

Le imbarcazioni da diporto in modo particolare richiedono un paio di carenaggi all'anno che comprendono tutta una serie di operazioni quali l'alaggio ed il varo, la pulizia della carena, la successiva messa in opera di antivegetativa.

Spesso, proprio per problemi connessi alla manutenzione ed al deterioramento del materiale strutturale molte imbarcazioni da diporto vengono messe in terra, nei mesi invernali.

Anche in questo caso l'armatore va incontro alle spese di alaggio e varo, nonché di rimessaggio.

In imbarcazioni metalliche, poi, ma anche in quelle in legno od in vetroresina, seppur con minore frequenza in queste, è richiesta la sostituzione degli anodi sacrificali, cosa che non avviene in una costruzione in titanio.

Ciclicamente occorre poi una revisione dei fasciami interni, in special modo delle sentine, dove oltre eventuale acqua vi si trovano olii ed idrocarburi che con il tempo eliminano la protezione data dalle vernici, questo tipo di manutenzione risulta estremamente onerosa e richiede tempi di manutenzione rilevanti.

In quella occasione stendere nuove mani di protezione risulta estremamente disagiata, data l'esiguità dello spazio e richiede, molto spesso lo smontaggio ed il successivo rimontaggio di apparati e componenti onde avere accessibilità ai fasciami.

Vi è ancora da dire delle manutenzioni straordinarie, dopo un certo numero di anni di vita di un'unità, che richiedono sovente mente la sostituzione di intere zone di fasciame.

Con il titanio questo non avviene.

Volendo concludere, in un esame globale, le valutazioni di carattere economico ad un maggior costo iniziale, che non risulta peraltro eccessivo, si contrappone e viene compensato ampiamente da un minor' costo di armamento ed allestimento dalla notevole minor richiesta di manutenzione, sia ordinaria che straordinaria, e soprattutto il titanio offre un mantenimento nel tempo del valore dell'intera imbarcazione.

E' in corso uno studio approfondito ed analitico, riferito a vari tipi di unità, relativamente al costo di gestione di una imbarcazione a seconda i tipi di materiale impiegato nella costruzione.

Non vogliamo anticipare i dati di questo studio, non ancora concluso, è comunque già accertato che i costi globali di gestione e manutenzione di imbarcazioni realizzate in Titanio risulta inferiore fino all'80 %.

Questo dato, indicativo al momento, dovrebbe fare riflettere sulla validità economica del materiale preso in considerazione.

## CONCLUSIONI

Dopo quanto precedentemente esposto appare evidente che l'utilizzo del titanio e di alcune sue leghe come materiale strutturale nelle costruzioni navali offre una grande serie di vantaggi che possono così essere riepilogati:

- Caratteristiche meccaniche di assoluta eccellenza,
- Assoluta mancanza di qualsiasi problema di corrosione,
- Assoluta affidabilità nel tempo,
- Un peso contenuto rispetto agli altri materiali solitamente utilizzati,
- Un grado di sicurezza non riscontrabile negli altri materiali,
- Una elevata economicità di gestione,
- Una manutenzione praticamente nulla,
- Un insieme di altre caratteristiche quali la riduzione di propagazione dei rumori e delle vibrazioni, la amagneticità, la mancanza di richiesta di protezioni antivegetative.

Per quanto attiene alla difficoltà di lavorazione si può rilevare che:

- nelle lavorazioni di macchina non esistono particolari differenze rispetto ad altri metalli,
- il procedimento di saldatura non è più complesso di quello delle leghe leggere, occorre unicamente la formazione di una specifica mentalità del saldatore di titanio.

Relativamente ai costi occorre evidenziare:

- l'allestimento e l'armamento di una unità in titanio richiede minori oneri che in altri materiali,
- che una imbarcazione in titanio non necessita di manutenzione
- che una imbarcazione in titanio mantiene nel tempo alto il valore dell'intero mezzo.

Infine, relativamente all'aspetto normativo.

- che i principali Registri di Classifica hanno preso in considerazione il materiale,
- che il calcolo strutturale può essere effettuato in modo diretto,
- che, comunque, R.I.Na. e Lloyd's Register già accettano come base di valutazione

la metodologia proposta dalla Ginatta Torino Titanium e dalla Fabroni Engineering.

Volendo porre uno forte stimolo alla cantieristica italiana suggeriamo, al fine di riacquistare competitività nella qualità, di interessarsi attivamente a tale tipo di materiale sfruttando la sensibilità di chi ha iniziato tale azione di diffusione del materiale, sforzandosi di adeguarsi a nuove tecnologie che sono le sole in grado di offrire competitività ai nostri prodotti.

## APPENDICE

### **Concetti di base per il calcolo strutturale**

La presente sezione ripresa dallo studio GTT - Fabroni Engineering intende determinare un metodo di calcolo per una struttura navale in lega di titanio che ad un tempo sfrutti appieno le eccezionali caratteristiche del materiale e risulti qualificato da parte degli Organi di Classifica.

Si dovrà in sintesi ripercorrere in termini brevi quell' iter tecnologico, culturale e normativo che ha portato all' individuazione , uso e qualificazione di altri materiali da costruzione, quali il cemento armato e l'acciaio in campo edile I o il legno I l'acciaio, le leghe leggere e la vetroresina in campo navale.

Si risconterà in definitiva che la maniera più adeguata per qualificare la struttura in titanio sarà quella di ricorrere al dimensionamento per calcolo diretto, come consentito da tutti i Registri di Classifica, provvedendo poi a verificare le condizioni di pari sicurezza rispetto una simile struttura in materiale normato. Per tale verifica andranno applicate ipotesi di carico di validità scientificamente riconosciuta, adottando limiti per le sollecitazioni e le deformazioni pari a quelli che si ottengono per strutture di analoghe proporzioni, dimensionate secondo il Registro, e sottoposte alle medesime condizioni di carico.

Tale iter progettuale evidenziato nell'allegato schema a blocchi.

### **La progettazione**

Il progettista di imbarcazioni da diporto non può non venir attratto dal titanio come materiale da costruzione navale, specie in un momento in cui si stà affermando prepotentemente una categoria di yachts di prestigio ed unità per usi, di dimensioni medio grandi, ad alta velocità, che costituisce certamente la maggior quota del mercato attuale.

Tale categoria di imbarcazioni, con lunghezze indicative tra i 20 ed i 50 metri, costituisce il top della progettazione nautica, o attinge contemporaneamente la meticolosità artigianale della cantieristica minore e la sofisticazione tecnologica ed industriale delle grandi navi di linea.

Anche la figura del progettista viene fortemente modificata rispetto al passato richiedendo una diversa organizzazione e struttura progettuale.

Da artigiano della progettazione, tuttofare ingegnere, architetto. arredatore , deve diventare un "project leader", cioè un manager al vertice di uno staff nel quale ogni componente deve dare, sulla scorta dei suoi indirizzi di base, la risposta più propria e coerente.

Si assiste così al formarsi di gruppi di progettazione, in cui convergono ingegneri navali (o naval architects , per dirla all' inglese) per la progettazione delle carene,

delle strutture, della propulsione e dell'impostazione di base, architetti per il taglio dei volumi esterni, la composizione dei volumi interni e lo styling generale, designers, per la cura dell'arredamento, del mobilio, del decoro, dell'accessoristica.

Il prodotto finale viene così a qualificarsi sia sotto l'aspetto tecnico vero e proprio, che quello, né secondario né accessorio, dello stile, del design non ch  della funzionalit .

Tutte le discipline che concorrono a qualificare questo tipo di naviglio hanno compiuto nel tempo vertiginosi passi in avanti: si pensi all'elettronica di bordo, all'impiantistica in generale, ai materiali e le tipologie d'arredo che portano a risultati, dal punto di vista abitativo, esaltati e non vincolati dalla relativa angustia degli spazi e del tutto impensabili sino a poco tempo f  .

Solo la parte propriamente navale, cio  la realizzazione dello scafo ha relativamente segnato il passo (salvo in alcune imbarcazioni a vela o a motore da regata), restando ancorata a tecniche e tecnologie che costituiscono il momento pi  "rusty and dusty" della progettazione e della costruzione.

Se si tien conto che tutte queste imbarcazioni o quasi sono ad alta velocit , o comunque imbarcazioni di grandi dimensioni e di prestigio, risulta palese invece l'importanza di realizzare una struttura leggera ma estremamente resistente e durevole e affidabile nel tempo.

Considerando poi l'aspetto economico, il loro alto valore porta a pensare ad un prodotto long life , indipendentemente dal suo costo, seppure ancorato a parametri commerciali, per realizzare una costruzione durevole e affidabile nel tempo.

Se il costo dello scafo rappresenta circa il 15-20 % del costo globale, si deve tener presente che un suo danno, per sottodimensionamento, cedimento strutturale o incidente, pu  comportare la perdita dell'intero capitale.

Dunque il problema scafo v  riesaminato attentamente, e merita un preciso approfondimento.

Anticipando un tema che verr  sviluppato pi  avanti, bisogna rimarcare fortemente che un'imbarcazione viene classificata dai Registri per la qualit  dei suoi materiali di scafo. per il loro dimensionamento e per i controlli che hanno subito in corso d'opera.

In sintesi la barca piace per il suo styling, comoda e fruibile per la sua architettura, ma vale ed   affidabile per il suo engineering.

In questo contesto la possibilit  di costruire in titanio si offre come eccezionale alternativa ai materiali tradizionali. prima che per specifici motivi tecnici, come nuova modalit  per elevare il contenuto tecnologico della lavorazione di carpenteria dello scafo.

A questo scopo   opportuno analizzare, almeno sommariamente, le caratteristiche dei materiali di uso corrente su queste unit .

Consideriamo in primo luogo l'acciaio comune da scafo. Esso risulta di facile

reperibilità, lavorabilità, saldabilità, basso costo e di bassa tecnologia applicativa. Di contro dà luogo a strutture pesanti, spesso troppo per scafi ad alta velocità, necessità di protezione dalle corrosioni e regolare manutenzione, spesso assai gravosa nel tempo.

Prendiamo poi la cosiddetta "vetroresina", ovvero le materie plastiche rinforzate con fibre di vetro o altro. Necessitano di lavorazione da stampo, non consentendo così economico impiego nel one-off, danno luogo a strutture meno pesanti dell'acciaio, più difficilmente modificabili, non abbisognano di protezione anodica, ma devono ancora dar prova di sé sul lungo periodo per quel che riguarda la resistenza all'osmosi e ai fenomeni di taglio interlaminare.

I compositi avanzati, quelli per intenderci di barche da regata come i Mori di Venezia o i Ferretto off shore, risultano materiali eccellenti quanto a caratteristiche meccaniche, ma di lavorabilità che richiede tecnologie avanzatissime, costi iperbolici senza offrire garanzie di resistenza nel tempo, nonché le necessarie garanzie di sicurezza relative all'incendio.

Questi tipi di materiali non possono essere presi in considerazione per imbarcazioni da diporto, anche se di elevate prestazioni, per i motivi sopra accennati.

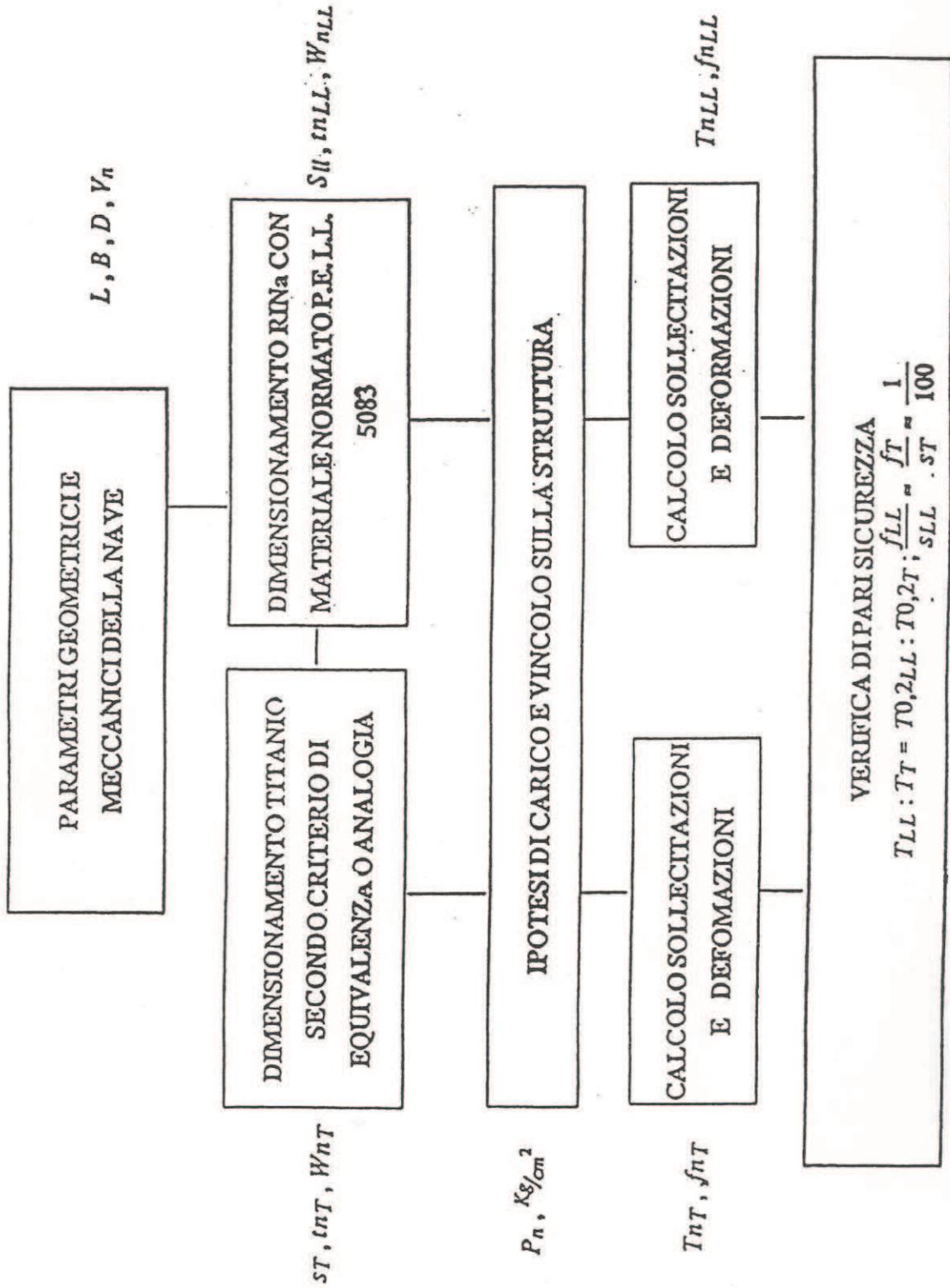
La parte del leone la fanno le leghe di alluminio. Consentono strutture leggere, da realizzare con tecnologie di uso comune, appena più impegnative di quelle dell'acciaio. La saldatura però abbatte le caratteristiche meccaniche del materiale base, che inoltre è molto sensibile alle diverse forme di corrosione ed invecchiamento, necessitando pertanto di idonea protezione e costante manutenzione.

Il titanio viene a porsi come notevole contendente, presenta caratteristiche meccaniche confrontabili con un buon acciaio (anche con il grado 2 che ha le minori caratteristiche meccaniche dei vari materiali presi in considerazione in questo studio), modulo elastico e peso specifico compresi tra acciaio e leghe leggere, resistenza alla corrosione superiore a quella degli altri due metalli, perfetta saldabilità e grande stabilità nel tempo. Come vedremo, nonostante il peso specifico doppio rispetto alle leghe di alluminio, consente strutture del pari e forse più leggere, a scapito solo di un leggero maggior costo e di una più attenta tecnica di saldatura.

Si pone il problema dei dimensionamenti e della qualificazione normativa della struttura e della sua esecuzione.

Su questo punto il titanio risulta scoperto rispetto agli altri due metalli, che sono già perfettamente definiti dalla Unificazione nazionale, né risultano determinati i metodi di lavorazione, e sono specificamente trattati dai Registri di Classificazione.

# SCHEMA DI FLUSSO DEL CALCOLO



## I REGISTRI DI CLASSIFICA

Per capire la portata ed il valore dei regolamenti di costruzione emessi da questi Enti è opportuno analizzare attentamente la situazione normativa vigente in Italia, simile del resto a quella di altre nazioni.

Il pilastro normativo che fondamento di tutta la legislazione sulle navi, loro costruzione e condotta, il Regio Decreto 30 marzo 1942 ,n. 327, noto come "Codice della Navigazione", che accomuna in maniera forse strana, la navigazione marittima a quella aerea.

Tale legge stabilisce, in diversi articoli, quali siano le competenze del Registro Italiano Navale. Possiamo così individuare:

Art. 130 : Stazzatura ; atto di grande rilevanza ai fini fiscali, economici e assicurativi,

Art. 161: Imposizione di riparazioni o demolizione; atti concernenti l'obbligo di manutenzione ai fini della pubblica incolumità,

Art. 166, 167, 168 Accertamento della navigabilità, classificazione ed emissione atti certificativi; conferimento de jure dell'incarico di Organo Tecnico capace di emettere norme tecniche e sorvegliarne l'applicazione.

Considerando che il Codice tratta anche delle responsabilità penali e civili connesse con l'inosservanza di tali norme, balza agli occhi il ruolo rilevante e responsabile che la legge conferisce al Registro Italiano Navale.

Valga a chiarirlo il seguente parallelo.

Si debba costruire una struttura civile in acciaio ottenute le prescritte autorizzazioni edilizie, sarà nominato un progettista delle strutture. Egli adotterà materiali classificati per esempio UNI 7070-72 e 5680-65 , applicherà i carichi prescritti, come normati da CNR-UNI 10012 -67, ed eseguirà il calcolo secondo CNR-UNI 10011-75.

La legge dello Stato 1086 d.d. 5/11/1971 impone che il progettista depositi copia degli elaborati presso gli uffici del Genio Civile, che venga nominato un direttore dei lavori che verifichi la rispondenza tra progetto e costruzione, e un collaudatore che esegua e verbalizzi il collaudo statico, copia del quale sarà pure depositata.

Le tre figure professionali si assumono quindi le relative responsabilità, lasciando agli Enti pubblici il compito di definire le modalità di calcolo e conservare, in maniera notarile, le copie degli elaborati.

Nel caso della progettazione di una struttura navale, gli elaborati devono venir realizzati secondo regolamento, sottoposti alla verifica e all'approvazione del Registro, che provvederà poi a sorvegliare l'esecuzione, far eseguire le prove sul materiale e sui metodi di costruzione, eseguire i collaudi della nave finita e certificarne la rispondenza.

Il Registro tramite i suoi Ispettori si assume quindi delle responsabilità dirette sulla costruzione per la quale sia stata richiesta la sua sorveglianza.

Non solo, ma mentre nel caso della costruzione civile le Norme si limitano a suggerire ipotesi di carico e le modalità di calcolo, il Registro fornisce delle formule per dimensionare direttamente spessori e moduli di resistenza.

Il progettista trova quindi nel Registro un forte punto di riferimento, che lo affianca in ogni fase del progetto e della costruzione, al fine di realizzare un prodotto di sicura affidabilità.

Molto spesso, a garanzia del Committente, si fa in aggiunta riferimento a Registri esteri, richiedendone la sorveglianza e la classificazione dell'imbarcazione.

Con questa premessa, la via per introdurre un nuovo materiale per la costruzione navale non può che passare per una fase di confronto ed analogia con i Regolamenti dei Registri - RINA certamente e Lloyd's Register per la sua rilevanza internazionale - nella quale possano venir individuati dei criteri base con i quali, in fase successiva, i Registri stessi possano far proprio il materiale in esame emettendone uno specifico Regolamento.

## I REGOLAMENTI DI COSTRUZIONE

L'epesegesi introduttiva è stata necessaria per introdurre all' argomento tecnici provenienti da settori diversi da quello navale.

Entriamo ora nello specifico, analizzando quanto previsto nei Regolamenti di costruzione.

Registro Italiano Navale (R.I.Na.)

Il R.I.Na , nel volume "Regolamento per la nautica da diporto" propone norme per la costruzione e la classificazione delle navi e delle imbarcazioni da diporto trattandole ai capitoli 4 e 5 rispettivamente per scafi in acciaio e per gli scafi in leghe leggere.

E' evidente anche ad una prima lettura, come il secondo derivi dal primo, anche a seguito dell' affermarsi più recente delle LL rispetto l'acciaio.

Potremo così analizzarli parallelamente, in modo da evidenziare differenze di trattamento in funzione di specifiche caratteristiche.

I paragrafi 4.1 , 5.1 trattano di norme generali, definizioni ed elaborati da presenta re e sono sicuramente validi anche per le costruzioni in titanio.

I paragrafi 4.2 , 5.2 , 5.3 descrivono i materiali de i collegamenti. Ben più succinto per l'acciaio, per il quale presenta un estesa forma tabellare, esclude per questo materiale la costruzione chiodata .

Per la lega leggera invece è ampiamente trattato il giunto chiodato, in quanto dato per scontato il decadimento meccanico del giunto saldato e pertanto il giunto chiodato viene rivalutato (anche se nella pratica di costruzione tale tipo di giunto viene usato esclusivamente in imbarcazioni da competizione).

Nel descrivere il materiale base frequente il riferimento a normative UNI, p.e. la 7070-72 per l'acciaio e la UNI 3574 per l'alluminio.

Particolare interessante che compare nell'alluminio il riferimento, in termini di equivalenza, tra le UNI e le AA (Aluminium Association), che individua un'apertura verso altri Enti di unificazione, del resto ribadita al punto 5.2.2.2 " ...la D.G. si riserva di ammettere, a suo giudizio, in base al presente art. 5.2 , altre norme unificate riconosciute".

La normativa ASTM quindi ha tutte le caratteristiche per venir considerata fonte certa di informazione sulle caratteristiche del titanio.

Nel caso del titanio non ci interesserà il collegamento chiodato, chè ad un materiale perfetta mente saldabile non comporta alcun utile.

Da evidenziare il punto 5.4 in quanto solo per la le leghe leggere il Registro Italiano dà

indicazioni sui criteri di protezione delle strutture dello scafo contro le corrosioni.

E' un paragrafo che, date le caratteristiche intrinseche del titanio e delle sue leghe relativamente alle resistenze ai vari tipi di corrosione non ha più ragione di essere.

I paragrafi 4.3 e 5.5 affrontano la definizione del dimensionamento dei singoli componenti la struttura dello scafo: spessori dei fasciami, larghezza, intervallo dei rinforzi. moduli di resistenza degli stessi.

I punti che ci interessano in maniera specifica sono i seguenti:

#### 4.3.4.) Impiego di acciai ad elevata resistenza (ER)

Si introduce un coefficiente riduttivo,  $K$ , proporzionale al maggior carico di snervamento  $R_s$  dell'acciaio, da applicare come radice di  $K$  negli spessori e  $K$  sui moduli di resistenza.

E' tabellato per acciai da 265 a 350 N/mm<sup>2</sup>, nei confronti di un acciaio "standard" da 235 N/mm<sup>2</sup>.

#### 5.5.2.) Coefficiente di dimensionamento $K_0$

Si introduce un coefficiente maggiorativo  $K_0$ , ottenuto dal rapporto tra 235 e il carico minimo di proporzionalità della lega utilizzata ( $235 / \sigma_{0.2}$ ).

Si imputa alla struttura saldata un decadimento delle caratteristiche meccaniche, implicitamente individua bile nel rapporto tra 150 e 235.

Da ultimo il Registro si riserva di valutare caso per caso l' utilizzo di leghe da saldatura con  $R_s$  150 N/mm<sup>2</sup> e per chiodatura con  $R_s$  235 N/mm<sup>2</sup>.

Sulla base del contenuto di questi due paragrafi può aprirsi un costruttivo confronto col Registro, in considerazione del fatto che il titanio di grado 2, normato secondo ASTM B 265-89 , presenta una forcella di carico di proporzionalità  $R_s$  da 275 a 450 N/mm<sup>2</sup>. Il valore minimo, che sarà quello da adottare nei futuri calcoli, si inserisce tra quelli presi in considerazione tra gli acciai ad alta resistenza.

E' poi opportuno passare direttamente alle norme che regolano le imbarcazioni ad alta velocità, che interessano gli yachts in esame, trattate ai paragrafi 4.12 e 5.14 rispettivamente.

Relativamente circoscritto il campo di applicazione; velocità sino a 35 nodi, lunghezza sino a 60 metri, strettamente definiti i rapporti geometrici e volumici.

La struttura realizzabile esclusivamente quella di tipo longitudinale, con imposto un valore massimo di calcolo pari a 3.75 per il rapporto tra la distanza tra gli anelli rinforzati e l'intervallo tra i longitudinali.

Vengono poi definiti dei coefficienti  $K_v$  maggiorativi per spessori e moduli di resistenza in funzione della velocità relativa  $\frac{V}{r^{0.5}}$  .

Facendo poi un passo indietro rispetto l'ordine degli articoli del Registro (ma avanti nel senso dell' iter progettuale) , compare la necessità, espressa ai punti 4.3.2. 4.3.3. e 5.5.3, di verificare il modulo di resistenza della sezione maestra (trave - nave) , per scafi di elevate dimensioni e prestazioni, secondo i criteri indicati alla Sez. B par. 7.3 (Navi sotto i 90 metri).

Si intravede quindi la disponibilità del Registro ad esaminare non solo soluzioni strutturali diverse da quelle normate (v. pro 4.1.1. e 5.1.1.) ma anche materiali di particolari caratteristiche, e di valutare sistemi di calcolo diretto (p.e. calcolo di verifica alle pressioni di impatto, ai momenti flettenti su onda...).

Lloyd's Register of shipping.

Questo ente di classificazione tratta congiuntamente in un unico capitolo (chapter 3 of part 2) dell' acciaio e delle leghe leggere.

Nelle sections 1 e 2 vengono descritti i materiali e le modalità di impiego.

Si osserva che:

al punto 1.6.2. si richiede la certificazione del produttore per tutti i materiali diversi dall'acciaio, nel caso dei tipi di titanio e delle sue leghe da noi prese in considerazione sarebbe auspicabile che questo Registro, stante le severe normative sul titanio, prenda in considerazione di valutare direttamente il materiale con procedura simile a quella dell'acciaio.

Al punto 1.5 , 2.3 , 2.4 , sia per l'acciaio che per l'alluminio, si impone la necessità di protezione dalle corrosioni, anche in questo caso tale indicazione non sarà necessaria per il nostro materiale.

La section 4 affronta la determinazione dei dimensionamenti.

Interessante il punto 4.1 , ove il Registro si dichiara disponibile a valutare dimensionamenti su calcolo diretto, imposti obbligatori per velocità superiori a 35 nodi, o velocità relative maggiori di 10.8.

Le proprietà meccaniche dell' acciaio base e dell'alluminio base sono rispettivamente:

Acciaio:	snervamento	235	N/mm <sup>2</sup>
	rottura	400 -490	N/mm <sup>2</sup>
	m. di Young	200*10 <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>

Alluminio:	proporzionalità	125	N/mm <sup>2</sup>
	rottura	260	N/mm <sup>2</sup>
	m. di Young	69*10 <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>

Si nota, com'è logico, una grande affinità col RINa salvo il fatto di citare esplicitamente il modulo elastico, valutazione di cui noi abbiamo tenuto conto particolare nel calcolo diretto secondo le indicazioni di Silva<sup>3</sup>.

Il rigore normativo con cui è classificato il titanio e le sue leghe, la particolare qualificazione dei produttori, come precedentemente evidenziato, fanno sì che le caratteristiche minime di produzione di ogni gruppo siano sempre superiori a quelle previste dalla normativa.

Questa considerazione dovrà essere tenuta presente dagli Enti di Classifica che desiderano regolamentare il materiale valutando non solo le caratteristiche di normativa, ma i livelli di produzione del medesimo.

Noi, in ogni caso, abbiamo assunto per il CP 2 (grado 2) i seguenti valori:

Titanio:	snervamento	345	N/mm <sup>2</sup>
	rottura	275-450	N/mm <sup>2</sup>
	m. di Young	10.5*10 <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>

Al successivo punto 4.3 compaiono i coefficienti K , simili a quelli adottati dal R.I.Na., per le strutture in acciaio ad elevata resistenza e per l'alluminio.

Per l'acciaio:

$K_s = 245 / e_s$  ,  $\sigma$  0.72 se maggiore; spessori da moltiplicare per  $K_s^{.5}$  , moduli per  $K_s$ . La limitazione a 0.72 del coefficiente non premia acciai (o materiali) con  $e_s$  340 N/mm<sup>2</sup>.

Per l'alluminio: .

$K_a = 235 / \sigma$  0.2 , oppure 1.36 se maggiore: gli spessori vanno moltiplicati per  $.95 * K_a^{.5}$  , i moduli per  $K_a$ .

La limitazione a 1.36 del coefficiente non premia leghe con resistenza maggiore di 172 N/mm.

Rispetto al R.I.Na. i fasciami godono di un 5 % di riduzione dello spessore.

Atteggiamenti quindi molto in linea tra loro, com'è logico attendersi , in quanto sono univoci i principi della scienza delle costruzioni a cui fanno riferimento.

Per quel che riguarda la struttura longitudinale , il Lloyd's Register fa riferimento ad un intervallo di 1 metro, maggiorabile fino ad un massimo di 2, limite del resto posto anche dal RINa.

Non viene invece limitato il rapporto tra l'intervallo degli anelli rinforzati e il passo tra i longitudinali, cosa che differenzia in una qualche misura i due regolamenti.

Si nota poi che il Lloyd's Register fa ricorso ad un' estesa rappresentazione tabulare per i valori dei dimensionamenti.

Le differenze tra i due. Registri esaminati sono in definitiva più formali che di merito, e, associata la disponibilità di entrambi di valutare metodi diversi, si ritiene in definitiva di poter proporre un unico metodo di calcolo del titanio, che dia risultati rispondenti ai criteri di sicurezza di entrambi i Registri.

### **Dimensionamento diretto**

E' stato naturale quindi, ogni volta che imbarcazioni affini per dimensioni e velocità sono state trattate con criteri diversi. fare dei paragoni e confrontare i risultati.

E' evidente altresì che, dalle corrette ipotesi di carico per il calcolo diretto di un'imbarcazione che rientri nei limiti dimensionali e parametrici dei Registri, non può uscire una struttura del tutto difforme da quella che scaturirebbe da un dimensionamento secondo Norme.

In casi del genere poi risulta possibile fare una mediazione tra il dimensionamento dei Registri e quello da calcolo diretto. in quanto evidente come le ipotesi di carico, per quanto frutto di attente analisi numeriche e statistiche, possano risultare eccessivamente prudenziali per il caso in esame.

L'esperienza ci porta a segnalare alcuni motivi di riflessione, che saranno evidenziati nelle tabelle relative ai calcoli proposti come esempio applicativo.

Per i fasciami i Registri dimensionano direttamente lo spessore.

In realtà, con l' ipotesi di un calcolo diretto che schematizzi una pressione idrostatica gravante su di esso, esso funziona come una lastra piana semincastata al contorno.

La sollecitazione che esso subisce è definita non dal suo spessore, ma dal suo modulo di resistenza, pur essendo quest' ultimo funzione diretta del primo.

I fasciami dimensionati dai Registri, quando sottoposti a calcolo diretto, risultano spesso molto sollecitati e molto deformati.

Benchè i Registri non ne facciano riferimento, nel calcolo diretto è sempre opportuno verificare la freccia, oltre che la sollecitazione.

Per uno sfruttamento ottimale di tale materiale l'esperienza ci ha portato ad infittire i rinforzi longitudinali, portando il loro intervallo al di sotto del valore di 0.8 Sr indicato dal RINa. Di conseguenza aumenta pure quel rapporto tra intervallo tra i trasversali e i longitudinali che il RINa fissa in 3.75 ( $4.12.3 : S = 0.8 Sr ; 1.3 Sr$ ), pur restando ampiamente entro i limiti per quel che riguarda il valore assoluto dell'intervallo tra i telai trasversali. Si vedano in tal senso i valori ottenuti nell'esempio con i due pannelli di  $300 * 900$  e  $250 * 1000$ .

Il valore di freccia, per le caratteristiche del materiale, prudenzialmente da noi assunto per il calcolo a cui si riferiscono le tabelle è di 1/100, ma riteniamo che il valore 1/75 sia ampiamente ammissibile e dia estreme garanzie.

Infatti l'impiego di un materiale con un modulo  $R_m$ /modulo elastico superiore ad altri presi in considerazione nelle costruzioni navali, rende necessaria la considerazione di frecce diverse pur restando un fattore di sicurezza ampiamente elevato.

Per quel che riguarda gli elementi strutturali sia longitudinali che trasversali, la verifica diretta ha evidenziato l'ottima risposta sia in termini di sollecitazione che di deformazione dei dimensionamenti secondo Registro.

Altro fatto da notare che, mentre i Registri impongono di conservare per tutta la lunghezza nave i valori calcolati alla sezione maestra, tutti gli approcci di calcolo diretto ammettono valori minori di battenti idraulici di verifica verso le estremità.

Il problema invero non ha quasi mai valenza pratica, in quanto il raccordo con strutture localizzate, quali banchi motore, braccioli, casse in doppiofondo, non consentono riduzione dei rinforzi in senso lunghezza - nave.

#### Esempio di applicazione

Sono state prese in considerazione, rispettivamente unità di 17 e 27 metri al galleggiamento, ne sono stati tracciati i piani di costruzione e sviluppati i calcoli delle carene diritte, e ipotizzata una geometria generale.

E' stato scelto un titanio di grado 2, secondo ASTM B 265 -89, come in premessa, preferendolo ad altri di più alte caratteristiche meccaniche per i motivi precedentemente esposti:

- contenuto costo
- facile reperibilità
- saldabilità perfetta
- caratteristiche meccaniche comunque elevate:

E' stata ipotizzata una distribuzione dei rinforzi che rientra nei canoni R.I.Na., con misure arrotondate (in unità metriche), come consuetudine a  $300 * 900$  mm, realizzando pannelli di fasciame con allungamento 1 : 3.

Sono stati calcolati secondo R.I.Na. e Lloyd's Register gli spessori dei fasciami e i moduli di resistenza dei rinforzi: longitudinali, madieri.

Il R.I.Na. non ci premierà per aver tenuto  $S$  a 300 mm contro i 340 e 376 ammessi rispettivamente, ma ci farà portare avanti i calcoli con questi due valori.

Nella futura normativa riferita al titanio sarà opportuno tenere conto di modificare intervalli di riferimento ed il rapporto  $S/S_r$  in funzione delle specifiche caratteristiche del materiale, ciò permetterà di avere informazioni elastiche più contenute a garanzia di una maggiore qualità del prodotto.

Si è considerata inoltre la velocità di 35 nodi la massima prevista dai Registri (E. V.).

Nelle tabelle allegate, al fine di non appesantirle, sono stati riportati i valori relativi ai soli elementi del fondo, in quanto sia i Registri che il metodo di calcolo diretto derivano i valori degli altri elementi strutturali come proporzionali a questi.

Per le ipotesi di carico nel calcolo diretto si è fatto riferimento alla pubblicazione "Small craft engineering : structures", del Michigan University, di Silvia, Scott e Michalopoulos, che calcola i carichi sul fondo in funzione della velocità. In genere i valori ricavati da tale pubblicazione sono piuttosto gravosi.

Le strutture delle due navi (rispettivamente di 17 metri e 27 metri al galleggiamento), dimensionate secondo i due Registri nei due materiali normati (Fe 42 B, con  $e_s = 235$  e Al 5083 con  $e_{0.2} = 130 \text{ N / mm}^2$ ) sono state sottoposte ai carichi di verifica e ne sono state calcolate le frecce e le sollecitazioni dei fasciami, longitudinali e madieri.

Si è passati poi ad un dimensionamento in titanio per affinità, adottando ciò il criterio proposto dai Registri, del rapporto tra le sollecitazioni al limite di proporzionalità, ed a una sua verifica coi medesimi carichi e nelle medesime ipotesi di vincolo.

Successivamente attraverso il medesimo iter, abbiamo realizzato e modificato la struttura "a longitudinali infittiti",  $250 * 1000$ , con rapporto 1 : 4.

Delle  $3 * 2 * 2 = 12$  strutture si poi calcolato il peso relativo, rapportando il peso delle strutture al metro quadro di fasciame.

Si è infine calcolato il modulo di resistenza delle sezioni maestre, rapportandolo ad un valore standard di momento flettente.

Salvo la perplessità sollevata dai valori elevati di sollecitazione raggiunti su tutti i fasciami, che depone forse a riprova delle ipotesi di carico valutate secondo il Silvia, si verificano positivamente tutte le strutture realizzate, verificando così la validità del criterio di derivazione acciaio - titanio adottato.

E' stato così raggiunto in definitiva il risultato voluto, di realizzare una struttura in titanio di pari leggerezza di una in lega leggera, se non inferiore (nei casi di titanio puro di grado 3 e di grado 4 e nelle leghe prese in considerazione), nonostante il peso specifico doppio, rispondente ai criteri di sicurezza dei Registri.

Questa struttura è molto meno sollecitata e assolutamente garantita inoltre dalle corrosioni.

## **CONCLUSIONI**

Le considerazioni svolte ci portano a concludere che il titanio e le sue leghe rappresentino una realtà dalla quale la cantieristica non potrà prescindere se vorrà ulteriormente innalzare il livello qualitativo e funzionale del prodotto nautico, sia impiegato per tutta la costruzione, che in unione ad altri materiali.

Il titanio infatti, e le leghe da noi prese in considerazione offrono qualità decisamente superiori, non solo come caratteristiche meccaniche, ma nella loro globalità, rispetto agli altri materiali fino ad oggi utilizzati e regolamentati dai Registri di Classifica.

I calcoli riportati precedentemente in questo studio si riferiscono al grado 2 (CP 2) che presenta oltre a buone caratteristiche e facile lavorabilità anche la possibilità di facile reperibilità commerciale ed economicità.

Non ultimo, si tenga presente che le sue caratteristiche meccaniche, in particolare il poria 345 N/mm<sup>2</sup>, rientrano nella gamma di valori in qualche modo "controllabili" nei termini previsti dai Registri per gli acciai ad alta resistenza.

Ulteriori progressi nell'ottimizzazione strutturale potranno pervenire dallo studio di una gamma di estrusi di sezione specificata mente studiata, nonché dalla divulgazione di tecniche affidabili di saldatura in cantiere su spessori sottili, al fine di poter utilizzare spessori minimi per le parti non sollecitate.

Questi steps tecnici consentiranno di utilizzare appieno le possibilità del materiale, e dare degli indirizzi normativi per poter introdurre le leghe di grado superiore, i cui **incredibili valori di resistenza esulano del tutto dal campo di valori presi in considerazione dai Registri anche per gli acciai ad alta resistenza.**

Volendo in prima battuta utilizzare il criterio dei coefficienti KO, ottenuti dividendo un valore di riferimento del sigma di proporzionalità per quello del materiale impiegato, si otterrebbe, per un titanio di grado 5 un coefficiente correttivo di 0,283 rispetto ad un acciaio da 235 N/mm<sup>2</sup>, con riduzioni di peso del 30 % rispetto l'AA 5083 e dell'80 % rispetto all'acciaio.

Si potrebbe altresì individuare una curva algebrica che interpoli i valori di resistenza ed i relativi K tabulati dai Registri per gli acciai ad alta resistenza, curva del tipo:  
 $K=(235+0.15* 0.2)/ 0.2$

Resta comunque elevata la portata dell'estrapolazione tra i valori tabellati, inferiori ai 400 N/mm<sup>2</sup>, e quelli che una lega di grado 5 ha, nell'intorno degli 800 N/mm<sup>2</sup>.

Va comunque tenuto presente che sparisce il concetto del sovrametallo da corrosione, ed ogni progetti sta sa che mezzo millimetro risparmiato sul fasciame costituisce un risparmio di peso molto maggiore di quello dato da un incremeto del passo tra le strutture.

Di seguito vengono riportati i coefficienti Kt per ogni grado di titanio. Tali coefficienti sono stati ottenuti dividendo il valore di riferimento di 235 N/mm<sup>2</sup> per i valori di snervamento dei rispettivi gradi di titanio definiti dalla norma ASTM:

Grado	Kt
2	0,854
3	0,618
4	0,484
5	0,283
6	0,296
9	0,484

Il coefficiente Kt può essere impiegato, in analogia con il KO delle leghe leggere, per determinare gli spessori dei fasciami e dei moduli di resistenza dei rinforzi longitudinali e trasversali.

# TABELLE DI CALCOLO PER SIMILITUDINE

(Ing. G. Svara - Ing. F. Grassi)

# CALCOLO DEL FASCIAME DEL FONDO SECONDO REGISTRO

s = 300 m/m S = 900m/m

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO m/m	ASSEGNATO m/m	PESO Kg/m <sup>2</sup>	CALCOLATO m/m	ASSEGNATO m/m	PESO Kg/m <sup>2</sup>	
	RINa	5,42			5,72			
ACCIAIO			5,5	44		6,0	48	
	L.R.	5,0			5,8			
	RINa	6,55			6,91			
LEGA L.			6,5	17,55		7,5	20,25	
	L.R.	6,39			7,4			
	RINa	4,63			4,89			
TITANIO			5,0	22,55		5,0	22,55	
	L.R.	4,62			5,36			
				LWL = 17.0m				
					LWL = 27.0m			

CALCOLO DEL MODULO DI RESISTENZA DEI LOG.LI DEL FONDO SECONDO REGISTRO  
 $s = 300\text{m/m}$   $S = 900\text{m/m}$

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO $\text{cm}^3$	ASSEGNATO $\text{cm}^3$	PESO Kg/ml	CALCOLATO $\text{cm}^3$	ASSEGNATO $\text{cm}^3$	PESO Kg/ml	
	RINa	8,72			9,66			
ACCIAIO			8,72			10,85 (min.)		
	L.R.	7,78			8,73			
	RINa	14,13			15,65			
LEGA L.			14,13			15,78		
	L.R.	14,07			15,78			
	RINa	7,45			8,25			
TITANIO			7,45			9,27 (min.)		
	L.R.	6,64			7,46			
				LWL = 17.0m				
					LWL = 27.0m			

CALCOLO DEL MODULO DI RESISTENZA DEI MADIERI SECONDO REGISTRO

s = 300m/m S = 900m/m

S = 2100m/m

S = 3100m/m

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO cm <sup>3</sup>	ASSEGNATO cm <sup>3</sup>	PESO Kg/ml	CALCOLATO cm <sup>3</sup>	ASSEGNATO cm <sup>3</sup>	PESO Kg/ml	
	RINa	170,96			412,75			
ACCIAIO			171			413		
	L.R.	129,98			301,41			
	RINa	276,96			668,66			
LEGA L.			278			669		
	L.R.	233,96			542,55			
	RINa	146,09			352,71			
TITANIO			146			353		
	L.R.	111,07			257,57			
				LWL = 17,0m	LWL = 27,0m			

# CALCOLO DEL FASCIAME DEL FONDO SECONDO REGISTRO

s = 250m/m S = 1000m/m

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO m/m	ASSEGNATO m/m	PESO Kg/m <sup>2</sup>	CALCOLATO m/m	ASSEGNATO m/m	PESO Kg/m <sup>2</sup>	
	RINa	5,42			5,72			
ACCIAIO			5,0	40		5,5	44	
	L.R.	4,45			5,24			
	RINa	6,55			6,9			
LEGA L.			6,5	17,55		7,0	18,9	
	L.R.	5,68			6,69			
	RINa	4,63			4,88			
TITANIO			4,5	20,29		5,0	22,25	
	L.R.	4,11			4,84			
				LWL = 17,0m				
					LWL = 27,0m			

CALCOLO DEL MODULO DI RESISTENZA DEI LONG.LI DEL FONDO SECONDO REGISTRO  
 $s = 250\text{m/m}$   $S = 1000\text{m/m}$

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO $\text{cm}^3$	ASSEGNATO $\text{cm}^3$	PESO Kg/ml	CALCOLATO $\text{cm}^3$	ASSEGNATO $\text{cm}^3$	PESO Kg/ml
	RINa	8,95			9,94		
ACCIAIO			8,95			10,85 (min.)	
	L.R.	8,44			10,06		
	RINa	14,5			16,10		
LEGA L.			15,3			19,6 (min.)	
	L.R.	15,26			18,18		
	RINa	7,65			8,49		
TITANIO			7,65			9,27 (min.)	
	L.R.	7,21			8,59		
			LWL= 17,0m			LWL= 27,0m	

CALCOLO DEL MODULO DI RESISTENZA DEI MADIERI SECONDO REGISTRO

s = 250m/m S = 1000m/m

S = 2100m/m

S = 3100m/m

MATERIALE	REGISTRI	CALCOLATO cm <sup>3</sup>	ASSEGNATO cm <sup>3</sup>	PESO Kg/ml	CALCOLATO cm <sup>3</sup>	ASSEGNATO cm <sup>3</sup>	PESO Kg/ml	
	RINa	189,53			458,6			
ACCIAIO			190			459		
	L.R.	144,42			335			
	RINa	308,35			746,1			
LEGA L.			308			746		
	L.R.	261,07			605,4			
	RINa	162			392			
TITANIO			162			392		
	L.R.	123,4			286,2			
				LWL = 17,0m	LWL = 27,0m			

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 27,0 m

LWL = 17,0 m

CASO	INTERVALLI	DENOMIN:	RICHIESTO	PESO		RICHIESTO	ASSEGNATO		PESO
				PESO	PESO		ASSEGNATO	ASSEGNATO	
FASCIAME DEL FONDO	s = 300 m/m S = 900m/m	W	cm <sup>3</sup>	t = 0,55 cm	0,0504	44 Kg/m <sup>2</sup>	0,0504	48 Kg/m <sup>2</sup>	0,06
		J	cm <sup>4</sup>		0,0138		0,0138		
		P	Kg/cm <sup>2</sup>		1,45		1,48		
		sigma1	Kg/cm <sup>2</sup>		2163		1855		
		sigma2	Kg/cm <sup>2</sup>		1081		928		
		f	cm		0,105		0,083		
		%			0,35		0,27		
<b>ACCIAIO</b>									
FASCIAME DEL FONDO	s = 250m/m S = 1000m/m	W	cm <sup>3</sup>	t = 0,5 cm	0,0416	40 Kg/m <sup>2</sup>	0,0416	44 Kg/m <sup>2</sup>	0,0504
		J	cm <sup>4</sup>		0,0104		0,0138		
		P	kg/cm <sup>2</sup>		1,45		1,48		
		sigma1	Kg/cm <sup>2</sup>		1817		1534		
		sigma2	Kg/cm <sup>2</sup>		909		767		
		f	cm		0,067		0,052		
		%			0,27		0,207		

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

L<sub>WL</sub> = 27,0 mt

L<sub>WL</sub> = 17,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.		RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
LONG. DEL FONDO	S = 300 m/m	W	cm <sup>3</sup>	(8,72)	8,7	2,39 Kg/ml	(10,85)	11,4	3,85 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>		40,5		72,3		
	P	kg/cm <sup>2</sup>	T 50 x 30 x 4	27,54	28,46				
	sigma	Kg/cm <sup>2</sup>		2137	1685				
	f	cm		0,055	0,032				
	%			0,06	0,035				
<b>ACCIAIO</b>									
snervamento = 2400 Kg/cm <sup>2</sup> E = 2100000 Kg/cm <sup>2</sup>									
LONG. DEL FONDO	S = 250 m/m	W	cm <sup>3</sup>	(8,95)	8,7	2,39 Kg/ml	(10,85)	11,1	3,85 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>		40,5		71,9		
	P	kg/cm <sup>2</sup>	T 50 x 30 x 4	22,95	23,7				
	sigma	Kg/cm <sup>2</sup>		2198	1734				
	f	cm		0,07	0,0406				
	%			0,07	0,0406				

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 27,0 mt

LWL = 17,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
MADIERI DEL FONDO	S = 300 m/m	W	(171)	180	13,12 Kg/ml	(413)	415	22,08 Kg/ml
		J	La = 420 x 5,5	2727		La = 620 x 6	7939	
		P	A = 200 x 5	55,08		A = 260 x 6	55,08	
	sigma	L 80x8	1124,5	L 120x10		1063		
	f		0,048			0,079		
	%		0,023			0,025		
snarimento = 2400 Kg/cm <sup>2</sup>	S = 2100 m/m							
	E = 2100000 Kg/cm <sup>2</sup>	S = 3100 m/m						
MADIERI DEL FONDO	S = 250 m/m	W	(190)	208	14,4 Kg/ml	(458)	460	23,52 Kg/ml
		J	La = 520 x 5,0	2958		La = 620 x 5,5	8815	
		P	A = 200 x 5	61,2		A = 270 x 6	61,2	
	sigma	L 100x8	1184	L 110x12		1065		
	f		0,05			0,079		
	%		0,023			0,025		
S = 1000m/m	S = 2100 m/m							
	S = 3100 m/m							

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 27,0 mt

LWL = 17,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.		RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
FASCIAME DEL FONDO	s = 300 m/m	W	cm <sup>3</sup>	t = 0,65 cm	0,0704	17,55 Kg/ml	t = 0,75 cm	0,0937	20,25 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>		0,0229			0,03515	
		P	Kg/cm <sup>2</sup>		1,45			1,48	
	sigma1	Kg/cm <sup>2</sup>	1548		1187				
	sigma2	Kg/cm <sup>2</sup>	774		594				
	f	cm	0,191		0,127				
	%		0,638		0,424				
<b>LEGA LEGGERA</b>									
FASCIAME DEL FONDO	s = 250 m/m	W	cm <sup>3</sup>	t = 0,65 cm	0,0704	17,55 Kg/ml	t = 0,7 cm	0,0816	18,9 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>		0,0229			0,0286	
		P	Kg/cm <sup>2</sup>		1,45			1,48	
	sigma1	Kg/cm <sup>2</sup>	1075		947				
	sigma2	Kg/cm <sup>2</sup>	538		437				
	f	cm	0,092		0,075				
	%		0,37		0,302				
<b>LEGA LEGGERA</b>									
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>snervamento = 1326 Kg/cm<sup>2</sup></p> <p>E = 7000000 Kg/cm<sup>2</sup></p> </div> <div style="width: 45%;"></div> </div>									

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 17,0 mt

LWL = 27,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
LONG. DEL FONDO	s = 300 m/m	W	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml
		J		120			120	
	P	27,54		28,46				
	sigma	978		1011				
	f	0,056		0,0578				
	%	0,062		0,064				
s = 900 m/m	W	cm <sup>3</sup>	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml
	J	cm <sup>4</sup>		120			120	
P	Kg/cm <sup>2</sup>	27,54		28,46				
sigma	Kg/cm <sup>2</sup>	978		1011				
f	cm	0,056		0,0578				
%	%	0,062		0,064				
<b>LEGA LEGGERA</b>								
snevrimento = 1326 Kg/cm <sup>2</sup>								
E = 7000000 Kg/cm <sup>2</sup>								
LONG. DEL FONDO	s = 250 m/m	W	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml
		J		120			120	
	P	22,95		23,715				
	sigma	1007		1040				
	f	0,071		0,0735				
	%	0,071		0,0735				
s = 1000m/m	W	cm <sup>3</sup>	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml	T = 70 x 4	19	1,32 Kg/ml
	J	cm <sup>4</sup>		120			120	
P	Kg/cm <sup>2</sup>	22,95		23,715				
sigma	Kg/cm <sup>2</sup>	1007		1040				
f	cm	0,071		0,0735				
%	%	0,071		0,0735				

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 17,0 mt

LWL = 27,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
MADIERI DEL FONDO	s = 300 m/m	W	277	281	6,6 Kg/ml	668	679	11,02 Kg/ml
		J	Le = 420 x 6,5	4496		La = 620 x 7,5	14535	
		P	sigma = 220 x 7	55,08		sigma = 300 x 8	55,08	
	sigma	L 90x10	730	L 140x12		650		
	f	cm	0,088			0,13		
	%		0,042			0,042		
snervamento: 1326 Kg/cm <sup>2</sup>	S = 2100 m/m							
	S = 3100 m/m							
E = 7000000 Kg/cm <sup>2</sup>	LEGA LEGGERA							
	MADIERI DEL FONDO	s = 250 m/m	W	308	301	6,86 Kg/ml	746	766
J			Le = 420 x 6,5	4731	La = 620 x 7		16810	
P			sigma = 220 x 7	61,2	sigma = 320 x 8		61,2	
sigma		L 100x10	730	L 150x12	640			
f		cm	0,093		0,125			
%			0,044		0,0403			

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 27,0 mt

LWL = 17,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
FASCIAME DEL FONDO	s = 300 m/m	W	t = 0,5 cm	0,0416	22,55 Kg/ml	t = 0,5 cm	0,0416	22,55 Kg/ml
		J		0,0104			0,0104	
		P		1,45			1,48	
		sigma1		2616			2671	
		sigma2		1308			1335	
		f		0,206			0,286	
		%		0,687			0,954	
FASCIAME DEL FONDO	S = 900 m/m	W	t = 0,45 cm	0,0337	20,3 Kg/ml	t = 0,5 cm	0,0416	22,55 Kg/ml
		J		0,00759			0,0104	
		P		1,45			1,48	
		sigma1		2290			1855	
		sigma2		1145			927	
		f		0,1854			0,138	
		%		0,74			0,55	
<b>TITANIO</b>								
snervamento: 2805 Kg/cm <sup>2</sup>								
E = 1050000 Kg/cm <sup>2</sup>								

# VERIFICA IN CALCOLO DIRETTO

LWL = 17,0 mt

LWL = 27,0 mt

CASO	INTERVALLI	DENOMINAZ.	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO	RICHIESTO	ASSEGNATO	PESO
LONG. DEL FONDO	s = 300 m/m	W	cm <sup>3</sup>	7,4	1,62 Kg/ml	L 60x6	7,4	1,62 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>	41,8			41,8	
	P	Kg/cm <sup>2</sup>	27,54	28,46				
	sigma	Kg/cm <sup>2</sup>	2512	2596				
	f	cm	0,107	0,1108				
	%		0,119	0,123				
		<b>TITANIO</b>						
LONG. DEL FONDO	s = 250 m/m	W	cm <sup>3</sup>	7,4	1,62 Kg/ml	L 60x6	7,4	1,62 Kg/ml
		J	cm <sup>4</sup>	41,8			40,5	
	P	Kg/cm <sup>2</sup>	22,95	23,715				
	sigma	Kg/cm <sup>2</sup>	2584	2271				
	f	cm	0,136	0,145				
	%		0,136	0,145				
		<b>TITANIO</b>						
		L 50x30x4						

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- L'utilizzo del titanio e di alcune sue leghe come materiale strutturale nelle costruzioni navali  
Ginatta Titanium Torino - Fabroni Engineering 1991  
E. Debernardi, A. Fabroni, G. Caciotti, A. Fogliarini, F. Grassi, G. Svara, L. Varalda
- Concetti di base per l'impiego del titanio e delle sue leghe  
Ginatta Torino Titanium 1990
- Le Lavorazioni di macchina del titanio e delle sue leghe  
Ginatta Torino Titanium 1990
- La saldatura del titanio  
Ginatta Torino Titanium 1990
- Titanium ASTM specifications  
1987
- Dhows to deltas a designer's saga  
A & A 1990  
Renato Sonny Levi
- Bollettini ASPRONADI  
AS.PRO.NA.DI. 1981 -1983 -1984 -1985 -1989  
C. Belletti, G. Giordano, S. Cavallaro, A. Fabroni, P. Fracchia, G. Svara, M. Baldi.
- Fondamenti di Idrodinamica  
HOEPLI 1984  
U. F. Costaguta
- Small Craft Engineering  
P. A. Silva, R. J. Scott
- Regolamento per la nautica da diporto  
R.I.Na. 1982
- Rules and Regulations far the Classification of Yachts and Small Craft Lloyd's Register of Shipping 1980
- Metals Handbook, ninth edition Voi II American Society for Metals
- Corrosion fatigue of metals in marine environments  
Battelle's Columbus Laboratories

- L. Lunde (Institute for Energy Technology)  
"Off-shore use of titanium - benefits and possible limitations"  
May 1987 - Kjeller, Norway
- Effects of compositions of filler wire on the mechanical properties of commercially pure and palladium alloyed titanium weldsment  
D. Rudinger and D. Fisher THYSSEN AG. Germany  
International conference of titanium, Kyoto Japan 1980
- Aspects metallurgique du soudage du titane et de ses alliages - etat de l'art"  
Marya - Le Maitre. Soudage et techniques connexes. Nov. Dec. 1989
- The effects of air contamination on the mechanical and fatigue properties of titanium weldsmentes  
Mantila -Hewikinheimo Pihkakoski Saarinen.  
Finland. Sixth world conference on titanium. Cannes France, 1988.

# Indice

ABSTRACT	pag. 1
PREMESSA	pag. 2
INTRODUZIONE	pag. 3
CENNI SULLE CARATTERISTICHE RICHIESTE DA UNA COSTRUZIONE NAVALE	pag. 4
A) Durata nel tempo della costruzione.	pag. 4
B) Assenza e/o scarsità di manutenzione.	pag. 5
C) Mancanza di fenomeni di corrosione ed osmosi.	pag. 6
D) Peso.	pag. 6
E) Caratteristiche accessorie.	pag. 6
F) Validità del costo di costruzione.	pag. 7
CENNI SULLE CARATTERISTICHE DEL TITANIO E DELLE SUE LEGHE SPECIFICAMENTE VALUTATE PER L'IMPIEGO NAVALE	pag. 7
CENNI SUI TIPI DI LAVORAZIONE DEL TITANIO	pag. 12
VALUTAZIONI DEFINITIVE SUI COSTI	pag. 12
Costi di costruzione dello scafo	pag. 13
Costi generali di costruzione	pag. 15
Costi di gestione e manutenzione	pag. 16
CONCLUSIONI	pag. 18
APPENDICE	pag. 20
Concetti di base per il calcolo strutturale	pag. 20
La progettazione	pag. 20
I REGISTRI DI CLASSIFICA	pag. 23
I REGOLAMENTI DI COSTRUZIONE	pag. 25

Dimensionamento diretto	pag. 29
CONCLUSIONI	pag. 31
TABELLE DI CALCOLO PER SIMILITUDINE	pag. 34
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	pag. 49

# PLASMA HEARTH MELTING OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS

Max P. Schlienger  
Retech, Inc.

The development and acceptance of plasma melting for the production of titanium has moved rapidly in the past five years. I would like to briefly cover this development and mention some of the benefits that can be realized with the application of plasma technology.

There are several advantages to consider in utilization of plasma melting for a variety of metals and melting applications. Some of the advantages are as follows:

1. Non-consumable melting tool.
2. Can be operated over a large range of pressures.
3. Used in cold wall or refractory lined furnaces.
4. A wide range of plasma gas chemistry can be applied.
5. Relatively low voltage operation 100 to 600 volts.
6. Long directional arc with appropriate gas flow.
7. Expensive gases (helium) can be recycled.
8. Mobility of arc permits hearth melting.
9. Clean up capability.
10. Excellent for difficult alloy combinations.

The above listed advantages have been the result of a continuing expansion of melting applications and a continuing improvement in techniques, equipment and understanding of the process.

The application of plasma melting technology to the production of titanium in the United States was initiated in 1981 when the Frankel Corporation had a plasma consolidation system built to enable the consolidation of a variety of titanium scrap that could be sweetened with virgin material when required. The Frankel unit was a horizontal boat melter that was used to consolidate materials that were fed into a water cooled copper boat which was moved in a horizontal motion below the plasma torch allowing the material to be fused into electrodes that could then be vacuum arc melted. The Frankel unit could produce consolidated

electrodes up to six meters in length and weighing approximately 3000 kilograms.

Following the Frankel unit "Oregon Plasma" installed a vertical withdrawal type melter in late 1983. This unit has been in successful operation for approximately eight years and has the capability of producing first melt titanium ingots from 350 mm in diameter to 700 mm in diameter and lengths up to 5 meters.

During this same period of time some of the U.S. aircraft engine manufacturers were engaged in active programs related to making powder products via the use of plasma. It was also found that plasma melting had some real advantages in melting of metals and alloys having high vapor pressures that were not compatible to vacuum melting. With its relatively long arc characteristics, it has also proved to be effective in hearth melting of a variety of materials including the following:

1. Titanium and Ti Alloys
2. Zirconium and Zirconium Alloys
3. Nickel Base Alloys
4. Niobium and its alloys
5. Chromium
6. Copper Alloys
7. Super Conducting Alloys
8. Memory Metals
9. A variety of other special alloys with wide variations in vapor pressures.

In 1985 Retech initiated the first plasma hearth melting in the United States with a two torch system. The initial hearth melting unit was equipped with a hearth torch rated at 250 kw and a crucible torch that operated at 100 kw. This furnace produced ingots primarily for R&D applications and to enable process development on hearth melting procedures. Since its start-up in 1985 the furnace has been upgraded to include two 350 kw plasma torches.

The Retech R&D furnace has been a very valuable tool to enable the advance development of computer aided torch programming, the study of appropriate gas recirculation systems, and a variety of other parameters that have proven to be helpful in the design and application of plasma

melting equipment.

In 1987 Wyman Gordon started up a large 2250 kw melter at its Worcester plant that has the capability of melting ingots to 7000 kg and also for producing nickel base powder. An R&D hearth melter has also been installed at Pratt & Whitney, East Hartford. In addition, General Electric has been very active in pursuing plasma processing for both ingot and powder applications.

In the latter part of 1989 Teledyne Allvac started up a plasma hearth furnace utilizing four 750 kw electrodes arranged in a rectangular pattern to facilitate torch mounting and movement. In the rectangular mounting geometry there is less interference with torch manipulation than is experienced when torches are lined up in a linear geometry.

The Teledyne plasma hearth furnace is used exclusively for melting of titanium, and titanium alloys. The capacity of the Teledyne plasma hearth melter is to produce ingots to 7500 kg.

It should be emphasized that the melting of titanium can be accomplished by using either helium, argon, or a mixture of these gases to obtain a desired melting result. When considering the use of helium for a plasma gas, it is almost mandatory to use a gas recycling system to enable an economic operation. In some applications a gas recycling system is not sufficient and a complete gas purification system may be required.

Generally speaking the best results in melting of titanium and its alloys are obtained when melting with helium or a helium argon mixture. In some cases melting at identical power levels the melt rate of a helium plasma gas and atmosphere will be double that which can be obtained with argon.

Another very important requirement for the successful operation of a multi torch plasma hearth melting system is the implementation of an appropriate automatic torch profiling system. It is virtually impossible for a furnace operator to manually control multiple torches and perform in a consistent manner to maximize ingot quality.

Retech has developed a computer aided system that controls not only the patterns and timing of four or more torches but also controls ingot withdrawal. Once torch profiles have been established for a given

alloy and ingot size, they can be stored and then recalled as required. The torch profiler has also built into the software, an interlocking system to prevent the crashing of torches into each other when overlapping patterns are required.

Many other interesting parameters relate to not only the gas or gas alloy that is applied to melting of a given material. For example, the furnace pressure can have a dramatic effect on not only the arc length (voltage gradient) of the plasma torch but it can also effect the melt rate depending upon the arc gas used and in some instances torch and crucible geometry.

A continuing effort is underway at Retech to improve many of the physical conditions appropriate to improving melting practice and applications of plasma processing.

Some of the additional applications of plasma technology presently being developed at our plant are related to the following technologies:

1. Recycling of metal dross and scrap.
2. Plasma pyrolysis and vitrification of toxic waste by application of plasma centrifugal furnace technology.
3. The application of plasma for welding of primary titanium electrodes.

To date, Retech has melted on an R&D basis in excess of 100 different metals and metal alloys, There is no doubt that the application of plasma melting techniques can be and will be applied to a very broad spectrum of melting requirements in the future as higher performance, cleanliness and alloy control become mandatory for advanced metals and ceramic applications.

<u>Slide No.</u>	<u>Description</u>
1.	Retech Plant site - Ukiah
2.	Title of Presentation. Plasma Hearth Melting of Ti & Ti Alloys
3.	10 Reasons for Using Plasma for Melting
4.	Frankel Furnace, First US Commercial Unit
5.	Oremet Furnace, Vertical Consolidation
6.	Concept - Schematic of First Plasma Hearth
7.	Photo of First Plasma Hearth Unit
8.	Schematic of Hearth with Dam
9.	Wyman Gordon Furnace
10.	Wyman Gordon Furnace - Molten Metal
11.	Pratt & Whitney R&D Furnace
12.	Schematic Teledyne Allvac Furnace
13.	Interior View of Teledyne Furnace
14.	Closeup of Hearth (Installation)
15.	Teledyne Control Console
16.	Gas Recycle Economics
17.	Arc Char. 80% He 20% Ar RP75T - 500 Amps
18.	Plasma Advantages for Ti Melting
19.	Torch Profile in Hearth
20.	Torch Profile in Hearth
21.	Melt Rate vs. Gas Mixture RP75T
22.	Voltage Gradient with He & Argon
23.	Voltage Gradient vs. Chamber Pressure
24.	Other Plasma Applications - Dross, Waste, Weld
25.	Plasma Test Melting
26.	Plasma Test Melting
27.	Plasma Test Melting
28.	Plasma Test Melting
29.	R The End

E. M. Brach del Prever\*, A. Massè\*, E. Vita Finzi Zalman\*\*

\* I Clinica Ortopedica, Università di Torino

\*\* Dipartimento ricerche e Sviluppo SEIPI-Milano

L'introduzione di materiali di nuova concezione ha contribuito con il perfezionamento delle tecniche chirurgiche e con l'ampliamento delle conoscenze biologiche, alla realizzazione del significativo progresso registrato in tutti gli ambiti ortopedici negli ultimi decenni.

A questo riguardo il Titanio e le sue leghe rivestono un ruolo particolare per la loro biocompatibilità e biofunzionalità.

#### BIOCOMPATIBILITA'

L'estensione delle indicazioni all'impianto di biomateriali ha determinato la modificazione del concetto di biocompatibilità fino alla definizione attuale:

BIOCOMPATIBILITY = THE ABILITY OF A MATERIAL TO PERFORM WITH AN APPROPRIATE HOST RESPONSE IN A SPECIFIC APPLICATION

I meccanismi implicati nel determinismo della biocompatibilità dei materiali da impianto sono in parte noti, e vengono ricondotti alla quantità ed al comportamento degli ioni liberati durante i processi di corrosione: le interazioni dannose con i tessuti vengono ricondotte a quattro meccanismi:

- il flusso ionico prodotto dal processo di corrosione può interferire con i processi di neurotrasmissione
- i prodotti delle reazioni inorganiche degli ioni liberati nei processi di corrosione vengono trasportati con i fluidi biologici in diversi organi; il loro accumulo può dare luogo ad effetti sistemici o a fenomeni di sensibilizzazione
- le reazioni organiche dei prodotti della corrosione con le proteine tissutali, con la loro denaturazione, possono

originare fenomeni infiammatori

- la produzione di H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> da parte di cellule infiammatorie e la formazione di radicali idrossilici può causare danni ai sistemi biologici

Il Titanio, analogamente agli altri materiali utilizzati in campo implantologico, si riveste spontaneamente di un sottile strato di ossido, automantenentesi per fenomeni di ripassivazione; la biocompatibilità del Titanio non sembra da ricondursi alla presenza di tale strato quanto al comportamento degli ioni e degli ossidi presenti all' interfaccia:

- il Titanio ed il suo idrossido sono poco solubili nei liquidi organici
- il Titanio, ione molto acido, ha scarsa attitudine di legarsi ai chelanti cellulari
- le interazioni organiche portano alla formazione di complessi stabili.

Il risultato è che l'omeostasi cellulare risulta influenzata dal Titanio in entità certamente inferiore rispetto ad altri materiali da impianto; è oggetto di ricerca la possibilità di una risposta immunitaria di tipo IV agli ioni di Titanio rilasciati nell'ambiente periimplantare, in soggetti predisposti.

Poiché il rilascio ionico è regolato da meccanismi di diffusione attraverso il film di ossido, nel caso di impianti di leghe di Titanio anche altri ioni si distribuiscono all' interfaccia; così l'uso di leghe di Titanio-Alluminio-Vanadio per impianti biologici presuppone un rilascio di Al e V, dimostrato sperimentalmente (fig.1); studi in vivo ed in vitro hanno dimostrato la bassa biocompatibilità del Vanadio.

In sede ISO è stata recentemente avanzata la proposta di introdurre una standardizzazione delle caratteristiche chimiche di altre leghe di Titanio destinate alla produzione di impianti

chirurgici; accanto alla conosciuta lega in Titanio 6-Alluminio 4-Vanadio vengono considerate le leghe Titanio 5-Alluminio 2.5-Ferro e Titanio 6-Alluminio 7-Niobio; studi in vivo su ratti hanno dimostrato che la biocompatibilità di queste ultime due leghe è sovrapponibile a quella del Ti puro, evento che viene ricondotto all' assenza di contenuto di Vanadio (fig.2).

#### BIOFUNZIONALITA'

Il Titanio e le sue leghe sono caratterizzati da proprietà meccaniche di grande interesse ortopedico.

La massa specifica è di 4.5 Kg/dm<sup>3</sup>, molto inferiore a quella degli acciai inossidabili (7.85 Kg/dm<sup>3</sup>) e delle stelliti (8.9 Kg/dm<sup>3</sup>), e si associa ad un valore del limite di fatica alla flessione-rotazione uguale o superiore a quello delle altre leghe da impianto; inoltre il modulo di Young risulta essere il più vicino a quello dell'osso corticale tra tutti i biomateriali (110 GN/m<sup>2</sup>) , con valori pari a metà di quello degli acciai e delle leghe a base di cobalto (200, 230 GN/m<sup>2</sup>) (fig.3).

Il valore dato dal limite di fatica alla flessione-rotazione diviso per il modulo elastico ( $\sigma_b/E$ ) è stato definito come BIOFUNZIONALITA'; da quanto è stato descritto risulta chiaro che questa risulta superiore per il Titanio e le sue leghe rispetto agli acciai ed alle stelliti.

I limiti tuttora connessi con l'uso del Titanio sono legati alle sue caratteristiche tribologiche: le limitate prestazioni riguardano la resistenza all'usura, al graffio ed alle rigature che possono originarsi durante l'impianto delle componenti, e che incrementano in modo esponenziale il rilascio ionico nell'ambiente periprotetico. L'accordo univoco sull'importanza di questo fenomeno nel determinismo della biocompatibilità ha stimolato la ricerca di sistemi atti a limitarlo: risultati

sperimentali e clinici soddisfacenti sono stati ottenuti con le metodiche di plasma-spray dei biomateriali con fosfato di calcio e vetri biodegradabili; per quanto riguarda l'uso del fosfato di Ca (Idrossiapatite, HA), la riduzione del rilascio ionico ottenuta con questa procedura viene ricondotta da studi recenti alle modificazioni nella composizione e nella struttura del film di ossido, che appare aumentato di spessore ed incorpora atomi di carbonio e calcio (fig.4).

I limiti sperimentalmente riscontrati di queste tecniche sono relativi alla durata dei rivestimenti.

Più recentemente è stata sperimentata l'impiantazione ionica di N<sub>2</sub> mediante bombardamento ad elevata energia, sempre al fine di migliorare la resistenza all'usura delle componenti protesiche, con la creazione di uno strato di Nitruro di Titanio; una variante a questa metodica prevede l'asportazione del film di ossido mediante bombardamento con Argon sotto vuoto: i manufatti sottoposti a questo trattamento sono stati testati con prove tribologiche in presenza di fluidi simili al liquido sinoviale; l'adesione del film di nitruri è risultata più elevata rispetto a quella ottenuta senza l'asportazione del film di ossido.

#### APPLICAZIONI DEL TITANIO IN CHIRURGIA ORTOPEDICA

Le caratteristiche sopradescritte sono risultate fondamentali, in chirurgia ortopedica, per lo sviluppo dell'implantologia articolare dell'anca.

Come notazione storica ricordiamo che il primo utilizzo del Titanio nella realizzazione di protesi d'anca risale al 1959, con la produzione in Unione Sovietica della protesi d'anca non cementata SIVASH.

I risultati ottenuti da Sir John Charnley nei primi anni '60 con l'ancoraggio protesico con Polimetil-Metacrilato (PMMA)

rappresentarono una fondamentale direttrice di guida nella chirurgia protesica: in questi anni l'impianto di protesi d'anca acquista una dimensione qualitativa e quantitativa del tutto nuove.

L'aumento del numero di impianti si è accompagnato ad un proporzionale incremento dei casi di fallimento meccanico; la mobilizzazione di un impianto cementato si associa invariabilmente a debridement del PMMA, che stimola una reazione cellulare da corpo estraneo; il risultato di questo fenomeno è rappresentato da riassorbimento zonale dell' osso periprotetico proporzionale all' entità della mobilizzazione; la scadente qualità del bone stock è un problema importante per il chirurgo, e si traduce in una ridotta aspettativa di sopravvivenza funzionale del secondo impianto.

Per questi motivi, nei primi anni '70 la ricerca si è orientata verso lo studio di sistemi di ancoraggio protesico alternativi al PMMA; l'assenza dell' interfaccia con il PMMA implicava che i biomateriali da utilizzarsi, venendo a diretto contatto con il tessuto osseo, dovessero avere una completa tollerabilità biologica a lungo termine; inoltre, venendo meno la funzione "riempitiva" del cemento, la ottimale trasmissione dei carichi sarebbe dipesa interamente dalle caratteristiche meccaniche del biomateriale e dalla forma delle componenti protesiche.

Restando tuttora dibattuto il problema della forma delle componenti protesiche, esiste oramai univoco accordo tra i produttori nel considerare le leghe di titanio come materiale elettivo nella realizzazione di impianti non cementati (fig.5,6).

#### APPLICAZIONI DEL TITANIO IN CHIRURGIA TRAUMATOLOGICA

L'utilizzo del titanio ha interessato in questi ultimi anni

anche la chirurgia traumatologica, sia nell'ambito della fissazione esterna che della fissazione interna e di quella endomidollare:

#### A) FISSAZIONE ESTERNA

La fissazione esterna può essere definita come metodo di osteosintesi in grado di stabilizzare monconi e frammenti scheletrici tramite elementi di presa infissi nell'osso a distanza dal focolaio, trapassanti le parti molli e raccordati reciprocamente da un apparato extrategumentario; attualmente, da semplice e passivo sistema sistema di bloccaggio osseo la fissazione esterna sta sempre più assumendo un ruolo biodinamico, cioè di veicolo biomeccanico attivo sulla catalizzazione e sul mantenimento dell'osteogenesi riparativa.

- fissatori esterni circolari: nel 1954 il Prof. Ilizarov pubblicò i primi risultati ottenuti con il suo prototipo di fissatore esterno, costituito da una serie di anelli trasversali raccordati con barre micrometriche longitudinali: il risultato era rappresentato da un esoscheletro cilindrico al quale venivano ancorati sottili fili d'acciaio transossei omnidirezionabili tramite appositi morsetti; la validità di questo sistema ne ha promosso la larghissima diffusione.

E' stato proposto l'uso del titanio per la produzione di anelli circolari di sostegno ai fili di Kirschner; il vantaggio dato dal Titanio in questo ambito sarebbe, secondo i produttori, connesso con le caratteristiche di basso modulo elastico e basso peso specifico; l'aumentata deformabilità dell'impianto soddisferebbe, enfatizzandolo, il concetto di "fissazione elastica", e si accompagnerebbe

ad un peso contenuto dell' impianto, con minor disagio per il paziente (fig.7).

- fissatori esterni assiali: in questi apparati l'osso viene ancorato tramite viti ad un esoscheletro retto, usualmente suddiviso in segmenti mobili; anche in questo caso il ridotto peso del titanio, impiegato nella produzione di morsetti, riducendo il peso complessivo del sistema, aumenterebbe la tollerabilità dell' impianto.

## B) FISSAZIONE INTERNA

La fissazione interna delle fratture viene realizzata secondo principi rigorosamente standardizzati, utilizzando mezzi di sintesi variamente forgiati, fissati all'osso tramite viti o fili in acciaio: la duttilità di questo sistema di fissazione lo rende capitolo fondamentale della chirurgia traumatologica ed ortopedica; i suoi limiti sono dati dal rischio di infezione (in questo caso la ridotta biocompatibilità è legata ad un'elevata adesione batterica in vitro agli acciai) e dalla rigidità dei manufatti in acciaio, che determina un bypass delle forze a livello del focolaio di frattura e dell' osso limitrofo.

In questo senso il Titanio presenta sicuramente delle caratteristiche vantaggiose, avendo maggiore biocompatibilità a medio termine e minore modulo elastico degli acciai.

Le prime ipotesi di utilizzo del Ti nella fissazione interna risalgono al 1951, quando Jergensen e Leventhal, analizzando il tessuto periimplantare di placche in Titanio, descrissero l' assenza di reazioni tissutali significative; verso la metà degli anni '50 iniziò la distribuzione commerciale di placche, chiodi e viti in Titanio per la sintesi interna (fig 8).

Per motivi economici la diffusione dei mezzi di sintesi in titanio non ha conosciuto fino ad ora la diffusione ipotizzata;

è comunque da segnalare la recentissima introduzione commerciale di placche a basso contatto tissutale (LC-DCP, Low-Contact Dinamic Compression Plate) e lo studio di placche a contatto puntiforme (PC-DCP) , entrambe realizzate in titanio puro; questa scelta è stata dettata dalla volontà di eliminare il rischio di rilascio ionico di vanadio: l'accoppiamento titanio-titanio o titanio- acciaio che si realizza nei complessi placca-viti si associa infatti ad un rilascio ionico periimplantare proporzionalmente più importante che per altri manufatti ortopedici.

#### C) FISSAZIONE ENDOMIDOLLARE

La fissazione endomidollare viene realizzata introducendo chiodi elastici nel canale midollare delle ossa lunghe.

Le caratteristiche già citate per la fissazione interna hanno suggerito l'impiego del Titanio nella produzione dei chiodi di Kuntscher, per garantire il rispetto del concetto di "fissazione elastica".

#### CONCLUSIONI

Le caratteristiche meccaniche e di biocompatibilità del Titanio ne hanno esteso l'utilizzo in campo biomedico a numerosi ambiti ortopedici e traumatologici; la migliore conoscenza dei processi che concorrono a determinare il fenomeno della biocompatibilità ha guidato la ricerca verso lo studio di soluzioni al problema del rilascio ionico, enfatizzato dalle recenti ipotesi immunologiche relative a possibili fenomeni di ipersensibilità di tipo IV al Titanio; le tecniche di impiantazione ionica rappresentano una via sicuramente promettente in tal senso; inoltre l'utilizzo di leghe prive di Vanadio potrebbe rappresentare un ulteriore passo verso l'ottenimento della

completa tollerabilità biologica.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1) J. Breme: "Titanium and titanium alloys, biomaterials of preference" VI World Conference on Titanium, France 1988
- 2) J. Breme: "Traditional and advanced titanium alloys for orthopaedic implants", meeting "TI titanio in ortopedia", Milano, 16-2-1990
- 3) E. Castaman: "principi biomeccanici di fissazione esterna", Aulo Gaggi Editore, 1986
- 4) R. Crowninshield: "An overview of prosthetic materials for fixation", Clin. Orthop. Rel. Res., 235, 166-172, 10-1988
- 5) E. Debernardi: "r..a resistenza alla corrosione del t.titanio e le sue leghe: caratteristiche chimico-fisiche e di comportamento", meeting "Il titanio in ortopedia", Milano, 16-2-1990
- 6) F. Denicolai: "Impiego del titanio in chirurgia ortopedica", 111 Meeting sul titanio, Torino 5-11-1987
- 7) P. Ducheyne: "In vitro and in vivo modeling of the biocompatibility of titanium" VI World Conference on Titanium, France 1988
- 8) C. Gabbi, G. Russo, L. Bo: "Impianto transcorticale rivestito in idrossiapatite", Annali Fac. Med. Veto Univo Parma, VI, 47-54, 1986
- 9) P. Gallinaro, E. M. Brach del Prever: "Aspetti tecnologici e clinici dell' interfaccia osso-biomateriale", Biomateriali, 1, 37, 1987
- 10) ISO/TC, 150/SC1 n'148
- 11) G. Lualdi, D. Minen: "Uso del titanio in sistemi avanzati applicati alla chirurgia ortopedica e traumatologica", SPERRI, 1987

- 12) B. A. Rahn, P. Gallinaro, A. Baltensgerger, S. M. Perren:  
"Primary bone healing: an experimental study in the rabbit",  
J. Bone Joint Surg., 53A, 783, 1971
- 13) S. G. Steinman, P. A. Mausli: "Titanium alloys for surgical  
implants-Biocompatibility from Physicochemical principles"
- 14) B. M. Tracy, R. H. Doromus: "Direct electron microscopy  
studies of the bone-hydroxylapatite interface", J. Biom.  
Mat. Res., 18, 719-726, 1984
- 15) E. Vita Finzi Zelman, E. M. Brach del Prever: "Il titanio:  
trattamento superficiale e rivestimenti", Biomateriali, 5-2,  
1991, 149-158
- 16) E. Vita Finzi Zelman: "Note tecniche sui materiali metallici  
utilizzati negli impianti ortopedici", Salice Terme 26-1-  
1990, Libro degli Atti

## RILASCIO IONICO DI VANADIO IN SOLUZIONE IN VITRO

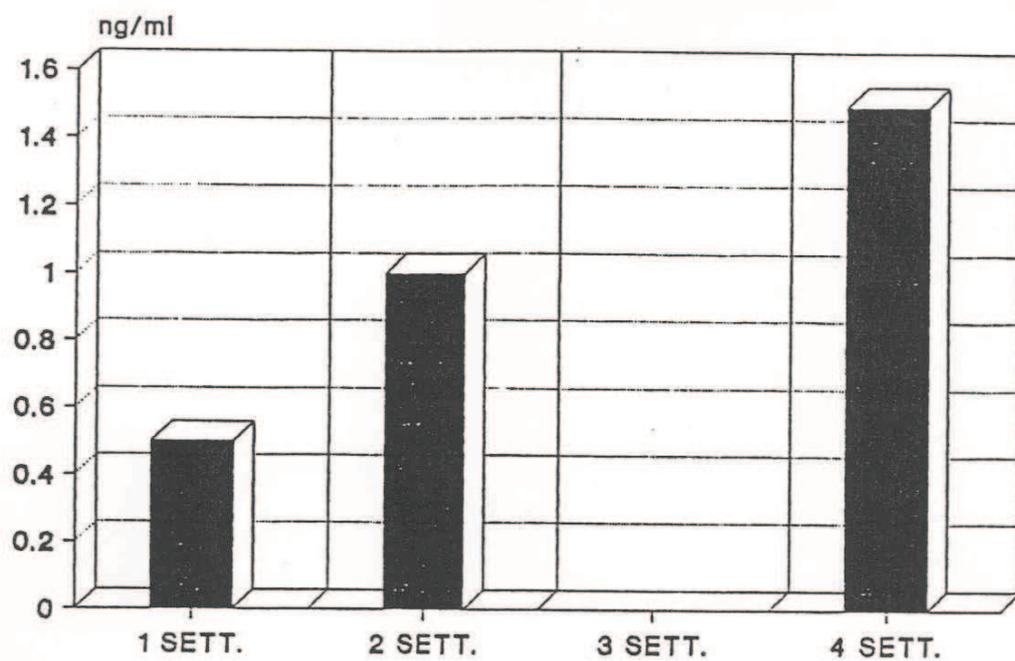


Fig.1

## LEGHE DI TITANIO PER IMPIANTI ORTOPEDICI COMPOSIZIONE CHIMICA

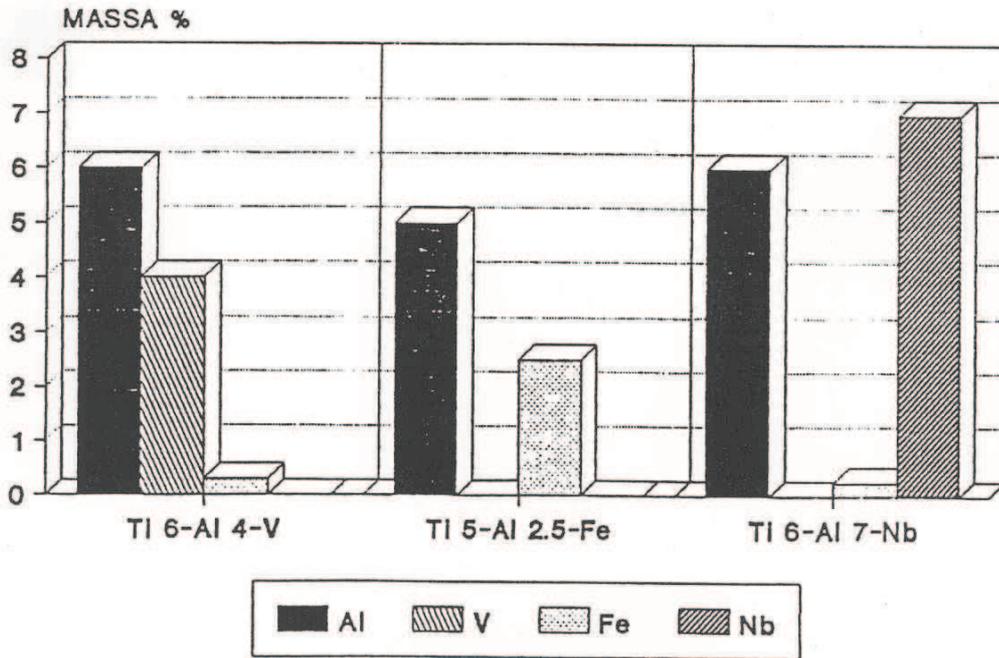


Fig.2

## BIOMATERIALI PER IMPIANTI ORTOPEDICI MODULO DI YOUNG

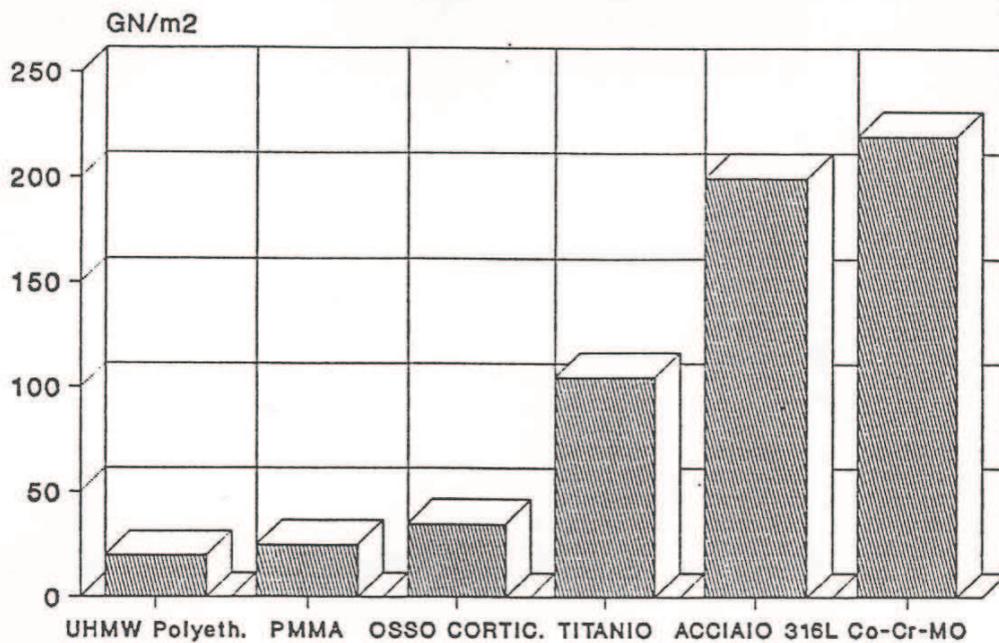


Fig.3

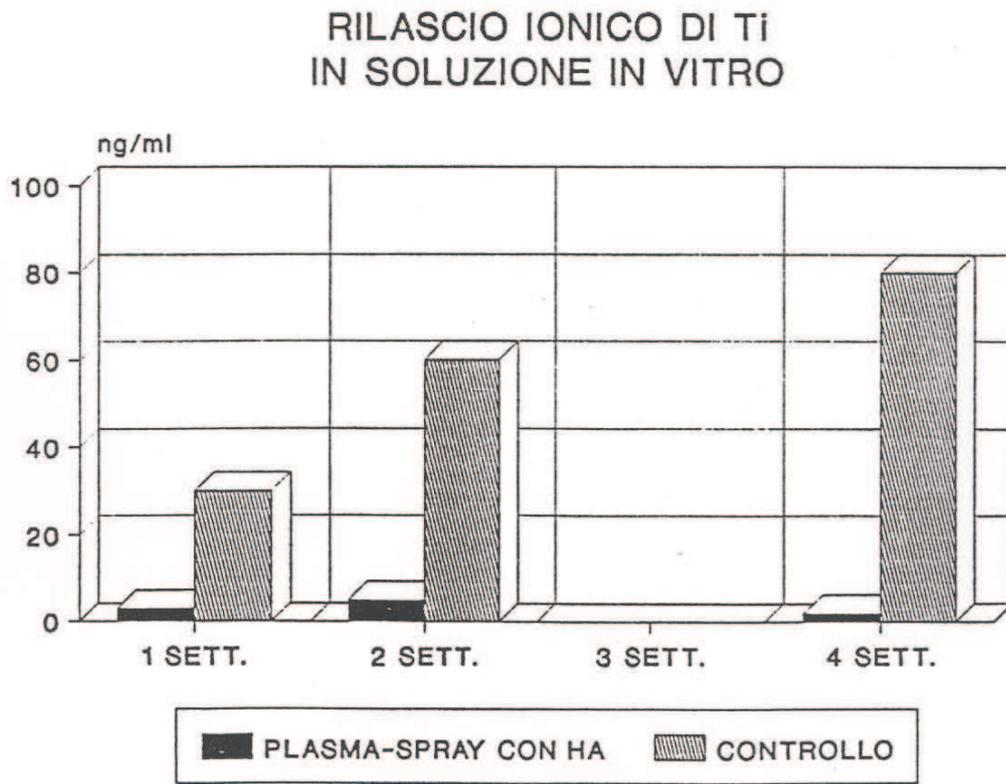


Fig.4

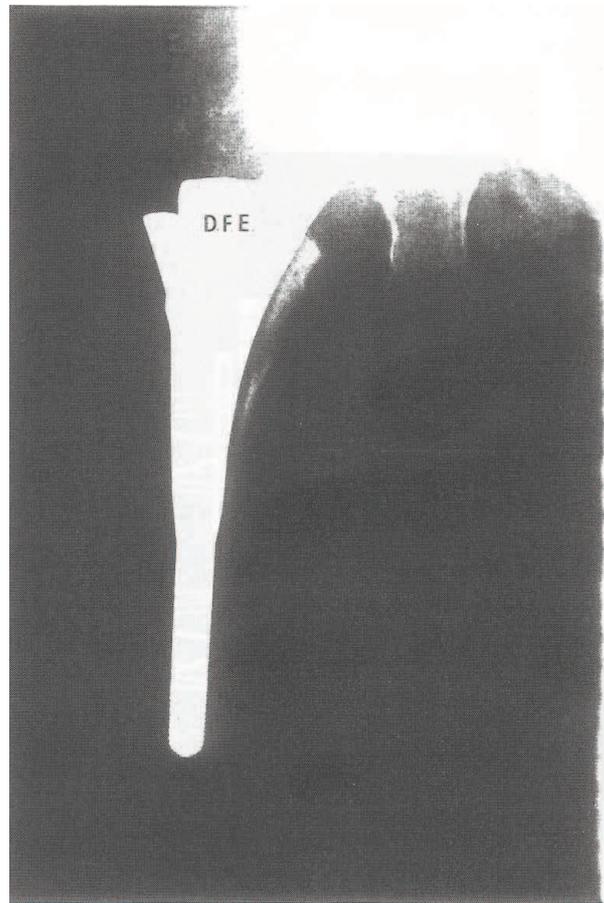
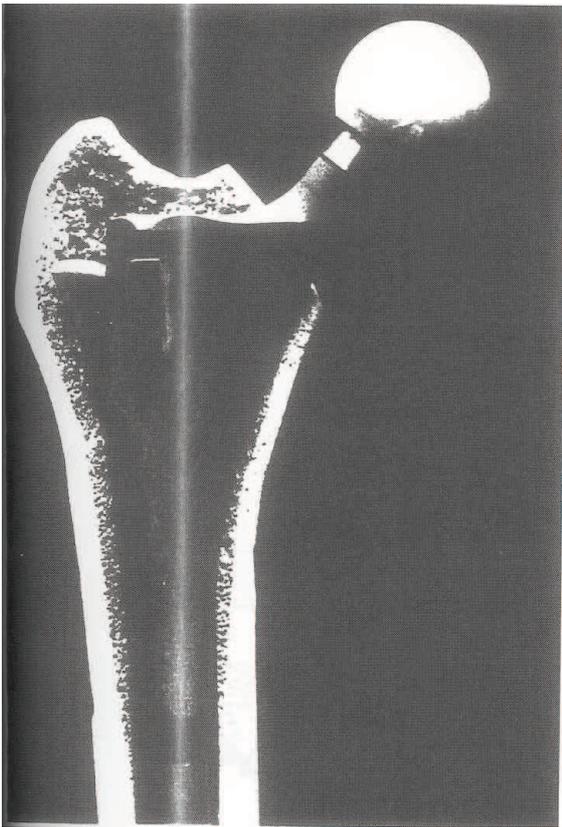


Fig.5: Protesi d'anca non cementata in Titanio:  
stelo "Pegasus"

Fig.6: Controllo radiografico post-operatorio



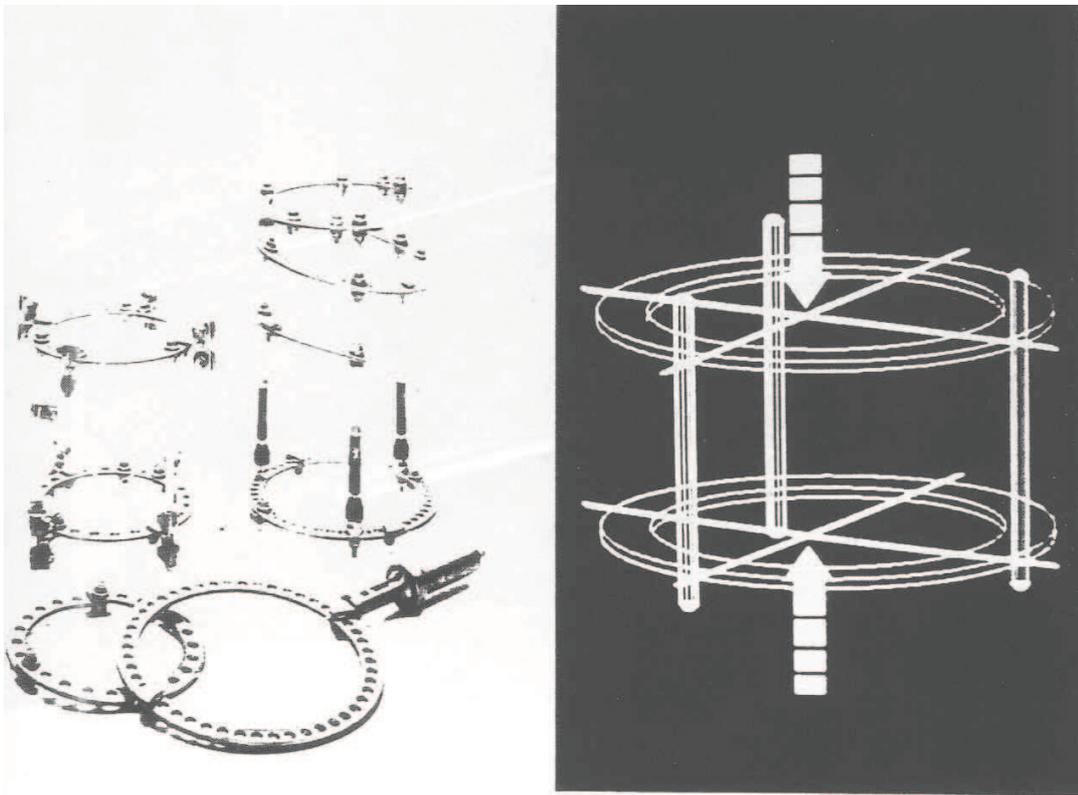


Fig.7: Fissatore esterno circolare  
con esoscheletro in Titanio

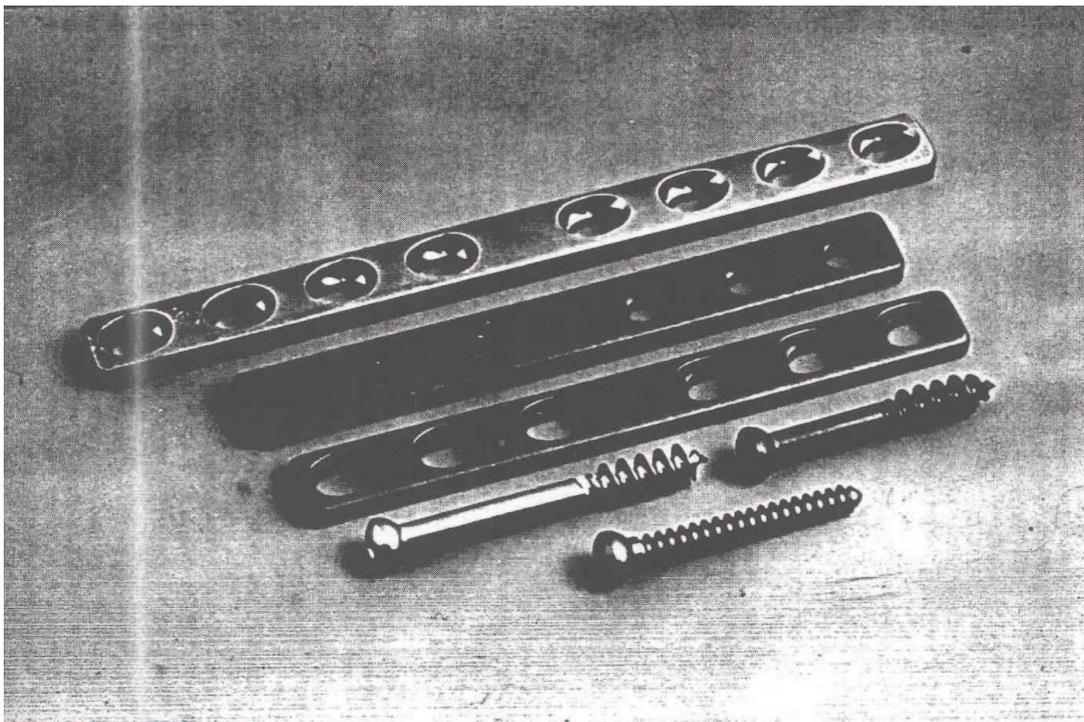


Fig.8: Placche e viti in Titanio



VII INTERNATIONAL MEETING ON TITANIUM

FURTHER DEVELOPMENTS IN TITANIUM  
AEROSPACE TUBING AND VERSATILITY  
OF TITANIUM IN SPORTS

Michael Drasdo  
Tubesales Ltd. (UK)

FURTHER DEVELOPMENTS IN TITANIUM AEROSPACE TUBING  
& VERSATILITY OF TITANIUM IN SPORTS

FIRST, I WOULD LIKE TO THANK GINATTA TORINO TITANIUM for making space, at the last moment for this brief presentation.

SECONDLY, the presentation is primarily on behalf of the Washington, U.S.A. division of the worldwide SANDVIK organisation, SANDVIK SPECIAL METALS.

It was the intention of CLYDE FORNEY & STEVEN MEREDITH of SANDVIK SPECIAL METALS to attend this TITANIUM event but their visit had to be postponed at the last moment.

&

THIRDLY, to introduce myself, as SALES MANAGER for AEROSPACE PRODUCTS for EUROPE of TUBESALES In Europe, Tubesales is based in Southampton, U.K. & St. Nazaire in France.

TUBESALES is sole-distributor & stockist for SANDVIK SPECIAL METALS in EUROPE of BOTH THEIR AEROSPACE QUALITY TITANIUM ALLOY & Ti 32.5R Radial texture Titanium tubing for recreational or sports purposes.

TUBESALES does not represent SANDVIK SPECIAL METALS in Medical Implant distribution.

Finally an apology or explanation, that I am not technically qualified to go into detail with delegates today on the points that we are highlighting with Sandvik products but clearly we are only too happy to take written questions accompanied by a visiting card and to process these.

The numerous items on display here, especially those in the Titanium Alloy 3Al 2.5v, are covered in the S.S.M. Engineering Guide for which Clyde Forney & Steve Meredith are joint editors. I have many copies available for distribution.

I must also explain that the sporting items displayed, which include Golf Club Shafts, Ski Poles, Bicycle Frames - parts applicable to both Racing & Mountain Bikes, Hockey Sticks & Tennis Racquets & Pool Cues, do not represent the complete range of the products of SANDVIK TITANIUM SPORTS. Again, I cannot claim to have had any personal experience of any of the various types but I will go on now to outline the properties of Titanium 3Al 2.5v APPLICABLE TO THEM.

I hope, following that long introduction, I have put in perspective the SSM or SANDVIK SPECIAL METALS involvement and my own involvement through TUBESALES.

A GOLF SHAFTS

We all recognise the basic property of Titanium with its HIGH STRENGTH & LOW WEIGHT ratios... special Heat Treatment of Ti 3.2.5 tubing yields exactly this result so that a basic shaft is 15 grams lighter, i.e. typically 100 grams against 115 for a steel shaft.

The SOFT FEEL of Titanium is stressed by SSM In that its low elastic modulus (half that of steel) dampens or softens the shocks & vibrations which then reduces the injuries to elbows & to arms which can occur.

QUESTION: are there any GOLF enthusiasts in the room who have experienced TITANIUM SHAFTS?

The excellent torsional properties lead to low torque shafts. This makes for straighter hits and less spin to the ball. A detailed paper on torsional properties by Steven Meredith, is available for those who would like copies.

Durability: Titanium's good fatigue resistance & fracture toughness enhance the life of a shaft, especially compared to graphite composite shafts (...it is quite clear that this particular property is highly relevant to use in hydraulic systems of the very latest aircraft & here in Torino, this same tubing is being used on the Eurofighter prototypes).

Corrosion Resistance: Titanium is resistant to any type of natural environment including salt water. This too is of great importance as many golf links seem to be built along sea coasts. Shafts will never rust or corrode and do not need to be painted or coated except for purely cosmetic or decorative reasons.

B Probably the greater usage of Titanium in sport is now in the production of frames for both mountain & racing bikes. In the U.S.A., SSM are the major producers of frames to proprietary designs and of course supply a basic range of tube sizes in their Radial texture Ti 325R to bicycle manufacturers worldwide.

The Bicycle Trade Fair is being held in Milano next Monday & Tuesday and the increased availability of the SSM Titanium Alloy has resulted in much interest from all over Europe, but especially here in Italy, the home of the finest designers.

We should include in discussion about TITANIUM in bicycle frames, its usage in Wheelchairs, where it will be understood that the weight is very critical.

Again HIGH STRENGTH is emphasised... the strength to weight ratio of Ti 325R is much greater than traditional Chrome Molybdenum steel or Aluminium Alloys.

Titanium frames can therefore be of lighter construction whilst still providing a better safety margin...

comparison weights are	Titanium	1450 grammes	
	Aluminium	1775	“
	Steel	2275	“

dampening characteristics lead to a smoother reel & softer ride... ergonomics at high speed!

The DURABILITY factor again means that Titanium's excellent fatigue resistance & fracture toughness increase the life of a frame. Small cuts & nicks will not cause premature failure as is found in composite frames.

CORROSION RESISTANCE - No paintings or coatings are needed to protect the frame from the elements & weather. Unlike an Aluminium frame, salt water will not lead to stress corrosion cracking and premature failure as a result.

WELDABILITY - The Ti 325R alloy is readily weldable if proper techniques are followed. No post-weld heat-treatment is needed and the welds retain their strength and durability.

## C OTHER SPORTS PRODUCTS

### i Include TENNIS RACQUETS

These, and other types of racquet, benefit from Titanium's properties in the same way as we have seen in Golf Shafts & Bicycle Frames but here the dampening effects are much more important, where injuries such as 'tennis elbow' caused by excessive vibrations, are commonplace.

Titanium is also an excellent spring material & releases energy when a ball is struck, giving greater power than other materials.

### ii SKI POLES... again benefit from Titanium's lightweight, durability & natural springiness.

### iii HOCKEY STICKS & POOL CUES - all reflect the advantages created by the Titanium properties already covered in earlier sporting examples.

### iv Finally, other usages such as Arrow Shafts, Polo Shafts & Back-Pack Frames will be seen to represent other ideal applications for Titanium tube.

and now to NON SPORTS applications

## D MEDICAL IMPLANTS

Titanium's compatibility with the Human Body Fluids have meant that increasing use is being made for Medical Implants. It is replacing Stainless Steel in many cases.

For example, the Titanium 3Aluminium, 2.5Vanadium Alloy is used in Femur Nails & Bone Screws and is replacing Titanium 6Aluminium 4Vanadium Alloy in these applications.

## E MEDICAL EQUIPMENT

We have covered, under Sports Goods already, the use of Titanium in Wheelchairs. Other prosthetic devices which include Stretcher Frames, Moveable Beds & Dental Braces etc., are now available.

For instance, Dentists' Drill Handles made by the super-plastic forming process are made in Europe using 325 Alloy.

Increasing research & development in the medical industry is certainly expected to raise the demand for this Titanium Alloy in this particular field.

## F INDUSTRIAL APPLICATIONS

Titanium 3Al 2.5V Alloy is now approved for use in Boiler & Pressure Vessel applications under its ASTM designation, B338 Grade 9 (also Section 8, Division 1 of the ASME Boiler and pressure vessel code).

Its usage In this application is due to its superior corrosion resistance to seawater and other chemical environments, as well as its important high strength-to-weight ratio.

The Sandvik Special Metals Engineering Guide for this Titanium Alloy emphasises the design allowable stress at 250 Degs C which is nearly 250% higher than Commercially Pure Titanium.

Again, they make the point that on an allowable stress-to-density basis, this Alloy of Titanium is 50% better than Inconel 625 & is almost twice as high as Hastelloy C276.

The oil-well industry has shown an interest in using 325Ti for sour-well applications.

Its CORROSION RESISTANCE makes it an attractive candidate to replace traditional stainless steels in seawater systems, desalination plants and chemical processes where the environment is particularly corrosive.

## G AEROSPACE APPLICATIONS

This presentation, as explained earlier, has concentrated on Titanium, alloyed with 3% Aluminium & 2.5% Vanadium. It was designed as a seamless tube primarily for aerospace hydraulic systems operating at pressures of between 3,000 p.s.i. in Commercial applications and up to 8,000 p.s.i. in Military aircraft, projects which are currently under development. These results are obtained through usage of heavier wall thicknesses but the incorporation of radial texture in the production process has ensured the finished tube is adaptable to production bending. The Sandvik Company are at the forefront of development of Titanium and Titanium Alloy usage in Tubular Form.

I have here an example of size 3/4" x .039" Seamless Ti 6Al 4V which is still at development stage at SANDVIK. It is in the Cold Worked Stress Relieved condition and has the following tensile properties:

Ultimate Tensile	145,800 psi
0.2% Yield Strength	126,200 psi
Elongation (% in 2 inches)	19.7%

over 3Al 2.5V this represents a considerable increase.

In Aircraft Engine applications Ti 3Al 2.5V is figuring more in the more modern examples such as V 2500 & the Eurofighter EJ200.

The use of tubing with higher mechanical properties is being studied to find new engine applications. It has been demonstrated that annealed tubing & tubing with higher grades of stress relieving can be formed using standard bending techniques.

In closing, I should refer to the use of Commercially Pure Titanium for Aircraft Ducting. Although in its various grades this is nothing new, there are examples here of very thin wall tube, welded tram annealed strip where once again, the strength-to-weight ratio of Titanium makes this metal a natural the aerospace world.

I hope, ladies & gentlemen, that this brief presentation with the Sandvik Company has proved of interest and I and they would be happy to receive questions but for my part, I cannot guarantee immediate answers.

Thank you and I thank the Ginatta Company for hosting this conference.

"Sviluppi nella produzione e nelle applicazioni del Titanio in Italia".

Ezio Debernardi (G.T.T. S.p.A.)

La G.T.T. continua la sua attività di studio delle tecnologie fusorie del titanio, allo scopo di individuare il processo migliore che, unitamente al processo elettrolitico di produzione, consenta di ottimizzare il rapporto qualità/costi del ciclo produttivo.

In quest'ambito si è dapprima installato, nel 1988, un forno V.A.R. pilota, tipo Leybold 200, mediante il quale è stato possibile acquisire conoscenze dirette sul processo fusorio considerato il "più tradizionale" e quindi "di riferimento".

Onde sfruttare le capacità acquisite ed effettuare uno scale-up industriale, nel corso di quest'anno è stato acquistato un impianto VAR più grande che verrà installato nel nuovo stabilimento in fase di costruzione.

Tale impianto può fondere lingotti di diametro massimo di 400 mm e peso in titanio di circa 1000 kg. Ha una potenza installata di 600 KW.

La taglia dell'impianto è adatta alla produzione di leghe alto legate dedicate ad impieghi industriali.

La ricerca nel campo dei sistemi fusori è continuata con la valutazione delle tecnologie del Plasma e dell'Electron-Beam.

Infatti tali tecnologie sono considerate come alternative economicamente molto valide rispetto al sistema VAR, sia in considerazione di poter effettuare miglioramenti metallurgici sui prodotti, sia in considerazione delle elevate percentuali di rottame riciclabili.

Contemporaneamente si è voluto indagare sul sistema di rifusione sottoscoria elettroconduttiva del titanio(ESR).

A questo proposito è stata avviata un'attività di studio di tale tecnologia.

Una possibilità che presenta l'ESR è la produzione di lingotti non solo di sezione cilindrica, ma anche quadrata e rettangolare (slebi) da poter inviare direttamente in laminazione a caldo evitandone la fucinatura, con un evidente risparmio di costi.

Nell'ambito della ricerca sono stati stretti degli accordi di collaborazione con l'Istituto di Ricerca Paton di Kiev. Tale istituto è uno dei principali centri in cui è stata sviluppata la tecnologia ESR e la sua applicazione sia al processo di fusione sia a quello di saldatura.

Frutto di tale collaborazione è un impianto pilota in grado di produrre lingotti di titanio del peso circa 50 kg che la GTT ha costruito ed installato presso lo stabilimento di Santena.

L'impianto è dotato di un'alimentazione elettrica di potenza da 450 KW e può lavorare in tutto il campo di pressioni tra il vuoto ( $10^{-2}$  mbar) e 1,2 bar.

La fusione viene condotta sia con controllo manuale sia con un controllo automatico della corrente implementato su PLC. L'impianto è attualmente in fase di collaudo e sono già state effettuate le prime fusioni di titanio.

Entro la fine dell'anno si avranno i primi risultati della caratterizzazione metallurgica dei lingotti fusi.

## Sviluppi nelle applicazioni del Titanio in Italia

L'impiego del titanio nella componentistica meccanica soggetta a severe sollecitazioni ci sta procurando sempre maggiori soddisfazioni.

Un paio di anni fa, Vi presentai le immagini del 1° prototipo di una pinza per un robot di saldatura in Ti 6AL-4V, seguirono l'anno scorso i successivi affinamenti ed oggi proprio su questo manufatto, siamo stati cointeressati con la Soc. Gerbi per la produzione di serie industriali che andranno ad equipaggiare le linee di assemblaggio di una ben nota industria automobilistica. E, sempre nel settore della robotica industriale, abbiamo approntato altri modelli di pinze destinati ad equipaggiare impianti siderurgici (laminatoio a caldo) che la Soc. Danieli sta allestendo per Paesi dell'Est.

Sempre in questo settore ritengo importante segnalare che alcune attività iniziate a livello sperimentale 2 o 3 anni fa, si sono concretizzate in normali produzioni a carattere industriale; cito ad esempio la produzione di viteria e bulloneria in titanio. Oggi vi sono almeno 3 o 4 produttori italiani che hanno inserito a catalogo tali prodotti.

Inoltre, oggi assistiamo anche alla nascita dei "servizi" (delle cosiddette facilities) agli operatori del settore. Infatti alcune ditte iniziano ad approntare utensili specifici, dedicati alle lavorazioni di macchina del titanio.

Cito come esempio la Soc. Utensa (Utensileria Meccanica Svizzera) che ha approntato dei lappatori cilindrici per titanio che possono essere montati su qualunque macchina utensile a mandrino rotante allo scopo di ottenere la lappatura di superfici cilindriche interne.

Altro settore in cui l'impiego del titanio si sta sempre più consolidando è quello dell'Edilizia e del Restauro.

Oltre ad aver già realizzato i primi prototipi di coperture tetti e di infissi esterni con Aziende di levatura internazionale come la Iscom e la Soc. Secco, che introdurranno questa gamma di prodotti nei loro cataloghi; ritengo che si sia riusciti ad introdurre in Italia l'impiego del titanio nel settore del Restauro di edifici e monumenti antichi. Infatti dopo la nostra collaborazione con la Sovrintendenza delle Belle Arti di Roma per il restauro della Fontana di Trevi e della Colonna Antonina, si è collaborato con la Sovrintendenza della nostra città per restauro della chiesa barocca di Santa Cristina.

L'opera del Juvarra, ubicata in uno dei luoghi della città a più elevata densità veicolare, aveva subito un profondo degrado ad opera della corrosione e della erosione operata dagli agenti atmosferici. I materiali metallici impiegati nella costruzione e nei precedenti restauri si sono pesantemente degradati, incrementando i danni ai materiali lapidei già per se stessi deteriorati.

La nostra azione si è articolata su due fronti; da una parte abbiamo sostituito con il titanio la maggior parte dei manufatti metallici esterni impiegati per il contenimento e/o il rinforzo di alcune parti architettoniche, come ad esempio le cerchiature metalliche dei pinnacoli sulla parte alta della chiesa e sul supporto della croce centrale. In alcune parti si sono impiegate leghe ad elevata resistenza meccanica.

Inoltre abbiamo "annegato" vere e proprie "protesi" di rinforzo strutturale per le parti in pietra delle statue.

Particolare difficoltà ha rappresentato il consolidamento della

statua di Santa Teresa dove un terzo del mantello era distaccato dal corpo di ben dieci centimetri.

Aggiornamento sull'attività della G.T.T. in ambito UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)

L'esigenza di disporre di una normativa italiana dedicata al titanio e alle sue leghe per gli impieghi industriali ci era stata segnalata da tempo.

Le ragioni sono molteplici:

- in primo luogo è importante fornire agli operatori del settore un riferimento in lingua italiana di chiara e facile consultazione.
- si sente l'esigenza di una normativa non derivata dalle più complesse norme aerospaziali ma creata già con la finalità di servire gli operatori dei settori industriali.
- tale normativa dovrà tener conto di tutti gli operatori del settore: clienti finali, trasformatori, commercianti e non ultima l'industria produttrice nazionale di recente costituzione.
- l'iniziativa permetterà in un prossimo futuro di partecipare al tavolo delle trattative in sede europea per la formulazione di norme unitarie (CEN).

Questo è lo stato di avanzamento dopo circa un anno di lavoro della Commissione Titanio formata da 2 G.d.L.,:

- Norme già formulate, ratificate della commissione, inviate all'indagine pubblica e in fase di approvazione al Gruppo

Settoriale I dell'UNI.

E12.00.001 "Titanio - Spugna di Titanio. Definizioni, caratteristiche e prove".

- Norme già formulate in attesa di essere ratificate dalla Commissione.

E12.00.002 "Titanio - Nastri, fogli, lamiere di Titanio e leghe di Titanio. Caratteristiche e dimensioni".

E12.00.003 "Titanio - Composizione chimica e caratteristiche meccaniche del Titanio non legato e leghe di Titanio".

E12.00.006 "Titanio - Tubi saldati e senza saldatura in Titanio non legato e leghe di Titanio".

E12.00.008 "Titanio - Tubi saldati e senza saldatura in Titanio e leghe di Titanio per condensatori e scambiatori".

- Norme in fase di approntamento

E12.00.004 "Titanio - Tolleranze dimensionali dei semilavorati". (Titolo provvisorio).

E12.00.005 "Titanio - Barre e prodotti lunghi". (Titolo provvisorio).

## Considerazioni sul Mercato del Titanio

Ricordando l'attenta analisi economica presentataci lo scorso anno dal Prof. Gros Pietro, mi sembra utile focalizzare alcuni ultimi sviluppi del mercato del titanio, al fine di presentare qualche riflessione sia agli operatori del settore, che a coloro che si accingono a diventare tali.

Come visto precedentemente in questo ultimo anno non sono mancate né gli stimoli né le conferme che l'impiego del titanio come materiale strutturale e non, è in forte ascesa negli impieghi cosiddetti industriali.

Le peculiari caratteristiche di questo materiale, per altro mai messe in discussione, stanno trovando sempre maggiori campi di applicazione.

D'altra parte ad una sommaria analisi, condotta anche "da profano", dei bilanci e delle situazioni dichiarate dalle industrie produttrici non si può certo affermare che l'intero settore sia fiorente e non senza preoccupazioni.

La flessione registrata dall'industria degli armamenti e dal mercato aerospaziale stanno convincendo (sicuramente con un forte ritardo) i produttori ad orientarsi sul mercato per usi industriali.

Tradizionalmente questa industria ha sempre privilegiato strategie che comportano una limitata produzione, venduta a prezzi elevati, anche in funzione degli elevati costi di fabbricazione.

Chiaramente il confronto con industrie produttrici di altri materiali, quali acciai inossidabili, leghe leggere, leghe ad alto contenuto di Nichel, ecc, che per quanto sofisticati sono tutte di matrice "siderurgica" e quindi tendono alle elevate

produzioni a costi e prezzi bassi, è molto duro.

Quindi si ritiene che per l'industria del titanio sia necessario, oltre ad una continua ricerca di proposte innovative dei sistemi di produzione, cambiare completamente gli atteggiamenti e le strategie di mercato.

Altro elemento che, a mio parere, convalida questa tesi, è il forte effetto sul mercato causato dalle massicce importazioni di materie prime ed ora anche semilavorati dai Paesi dell'Est.

L'abbassamento del prezzo del prodotto ultimamente è stato consistente e se da una parte è causa di serie preoccupazioni delle industrie produttrici occidentali, dall'altra è sicuramente un grosso aiuto a rendere più concorrenziale il titanio.

Ricordo, infine, che in questo contesto opera ormai da circa due anni la Soc. Titania del gruppo ILVA, nostro polo nazionale.

Il contesto in cui è nata e deve operare non è semplice, ma ha le prospettive per un rapido decollo.

Concludendo si ritiene che nonostante le non facili condizioni al contorno il titanio abbia, se aiutato dagli stessi operatori con un "aggressivo" sviluppo di mercato, ottime possibilità di espansione in tutti i settori.

CONSMKT-LF4

J. K. Gregory<sup>1</sup> and L. Wagner<sup>2</sup>

1 GKSS Research Center, W-2054 Geesthacht, Germany

2 Technical University Hamburg-Harburg, W-2100 Hamburg  
90, Germany

HEAT TREATMENT AND MECHANICAL BEHAVIOR IN Beta-C™

## INTRODUCTION

Owing to the precipitation of the stable  $\alpha$ -phase at temperatures between 350-600 °C, the solute-rich metastable  $\beta$ -titanium alloy Beta-C™ (Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo) can be heat treated to strength levels ranging from 850 MPa (in the as-solution heat treated condition) to over 1500 MPa [1]. Normally, precipitation is heterogeneous, resulting in an uneven distribution of  $\alpha$ -precipitates such that some areas are precipitate-free. One way to obtain a uniform  $\alpha$ -phase distribution is to carry out "duplex aging," [2] where a pre-age at 425-480 °C produces fine, uniformly distributed precipitates, and a final age at 480-590 °C completes the aging treatment. Evaluation of fatigue and fracture toughness behavior for Beta-C heat treated both by direct aging and by duplex aging to a yield stress of 1080 MPa shows that duplex aging results in superior smooth specimen fatigue limits with no sacrifice in toughness or ductility. The correlation between strength, fatigue behavior, and toughness is discussed for several heat treated conditions.

## HEAT TREATMENT

Material was received from Robert Zapp Werkstofftechnik in Dusseldorf in the form unidirectionally rolled plate. A solution heat treatment of 1/2 h at 927 °C on 13.5 mm thick samples followed by air cooling was found to be suitable to achieve complete recrystallization. The following six aging treatments were performed after this solution heat treatment (SHT):

16 h 500 °C	4 h 455 °C + 16 h 555 °C
16 h 530 °C	4 h 440 °C + 16 h 560 °C
16 h 540 °C	1000 h 250 °C

## MICROSTRUCTURE

Figs. 1 - 6 show the microstructures obtained after the heat treatments performed. The as-SHT condition in Fig 1 is characterized by equiaxed  $\beta$ -grains with a diameter of 160  $\mu\text{m}$ . After direct aging at 530 °C as well as 540 °C (Figs. 2 and 3), precipitation of the  $\alpha$ -phase (the dark areas) is inhomogeneous, leaving regions roughly 25 by 100  $\mu\text{m}$  which are precipitate free (the light areas). Duplex aging with a pre-age at 455 °C results in a somewhat more homogeneous distribution of the  $\alpha$ -precipitates (Fig. 4), while an even distribution is obtained after a pre-age at 440 °C (Fig. 5). The long-term age of 1000 h at 250 °C does not produce any changes which can be seen by optical microscopy (Fig. 6).

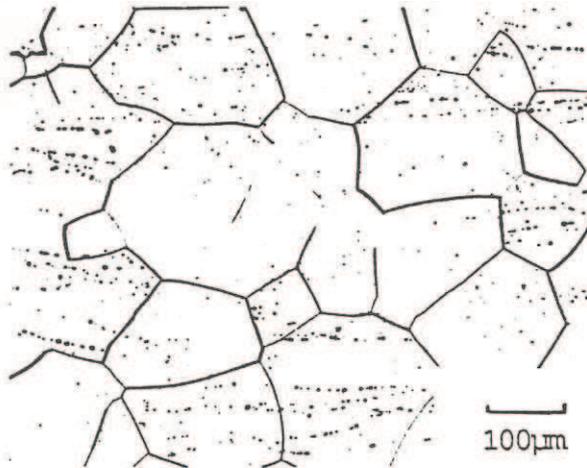


Fig.1: Microstructure of as-SHT condition

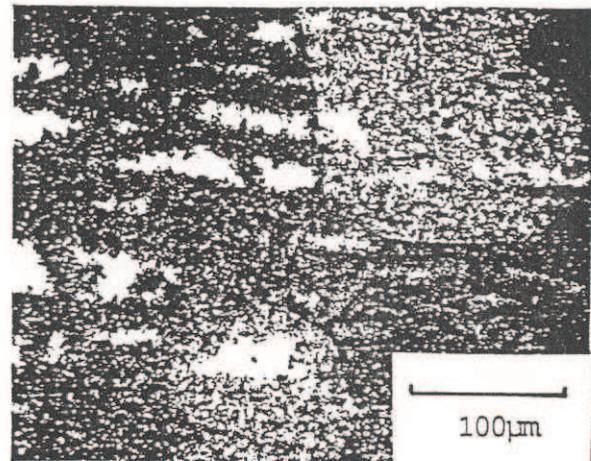


Fig.2: Microstructure after aging 16 h at 530 °C

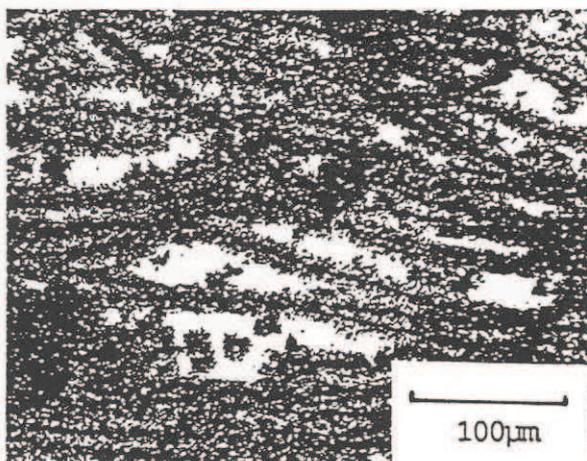


Fig.3: Microstructure after aging 16 h at 540 °C

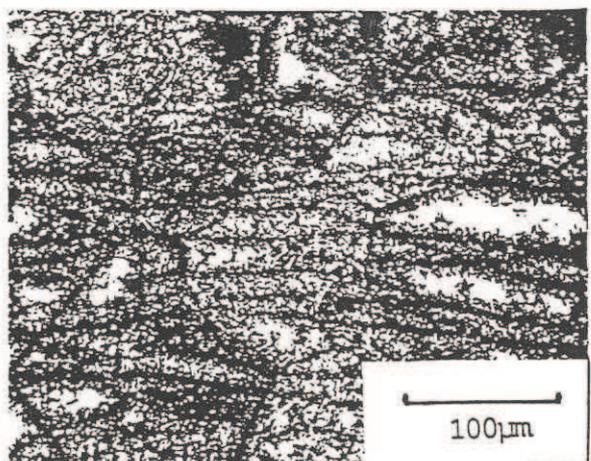
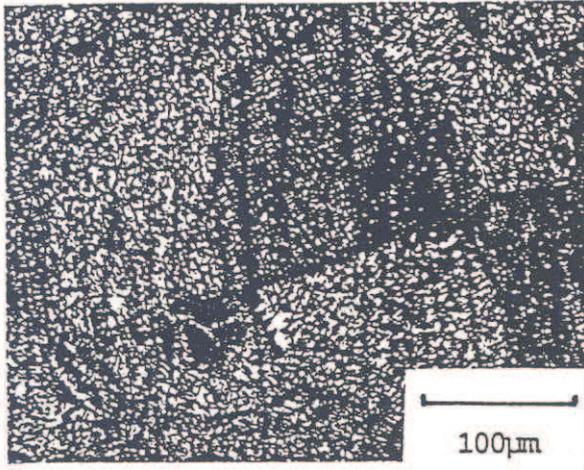
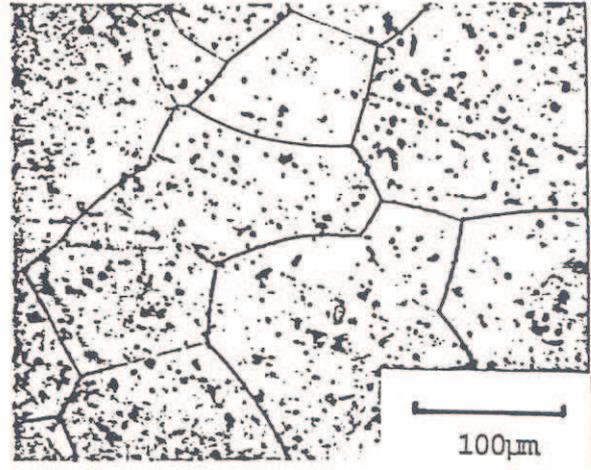


Fig.4: Microstructure after 4 h 455 °C + 16 h at 555 °C



**Fig.5: Microstructure after 4 h 440 °C + 16 h at 560 °C**



**Fig.6: Microstructure after aging 1000 h at 250 °C**

### TENSILE PROPERTIES

The tensile test results for the heat treated conditions evaluated are shown in Table 1. All tests are for the tensile direction parallel to the rolling direction. For aging times of 16 h in the temperature range chosen, heat treatments which cause the  $\alpha$ -phase to precipitate result in 0.2 % offset stresses of 1000-1140 MPa. The 0.02 % offset values for  $\alpha$ -aged material vary between 960 MPa (after 16 h at 500 °C) and 1035 MPa (after aging 16 h at 530 °C or 4 h 440 °C + 16 h 560 °C). The loss of ductility after heat treating 1000 h at 250 °C is likely to be due to the formation of the  $\omega$ -phase, which can only be seen with transmission electron microscopy.

Table 1: Tensile Properties of Beta-C after various heat treatments.

Heat Treatment	E (GPa)	$\sigma_{0.02}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	UTS (MPa)	elong (%)	RA (%)
as-SHT	88	820	850	850	25	62
16 h 500 °C	94	960	1065	1130	9	21
16 h 530 °C	96	1035	1140	1220	12	21
16 h 540 °C	106	1005	1085	1165	13	23
4 h 455 °C + 16 h 555 °C	99	1000	1065	1215	14	27
4 h 440 °C + 16 h 560 °C	103	1035	1085	1140	12	24
1000 h 250 °C	114	--	--	1180	0	0

FATIGUE BEHAVIOR

Fatigue behavior was evaluated on smooth, electro-polished specimens under rotating beam loading (fully reversed) in air at 50 Hz. The S-N curves in Fig. 7 show the influence of a 16 hour direct aging treatment at 500 °C, 530 °C, and 540 °C. In general, the endurance limit scales with the strength level  $\sigma_{0.02}$ . Accordingly, the lowest endurance limit is exhibited by the as-SHT condition and the highest by the condition aged 16 h at 530 °C.

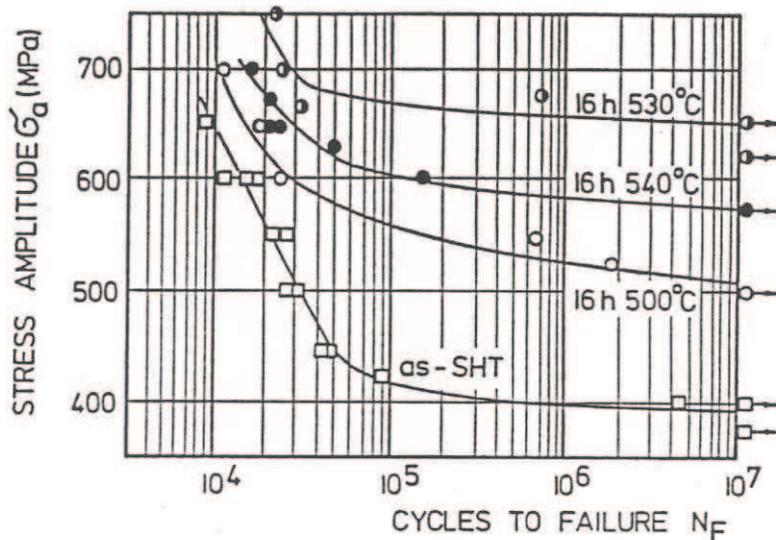


Fig. 7: S-N curves at R=-1 comparing as-SHT condition with those aged 16 h at 500 °C, 530 °C and 540 °C.

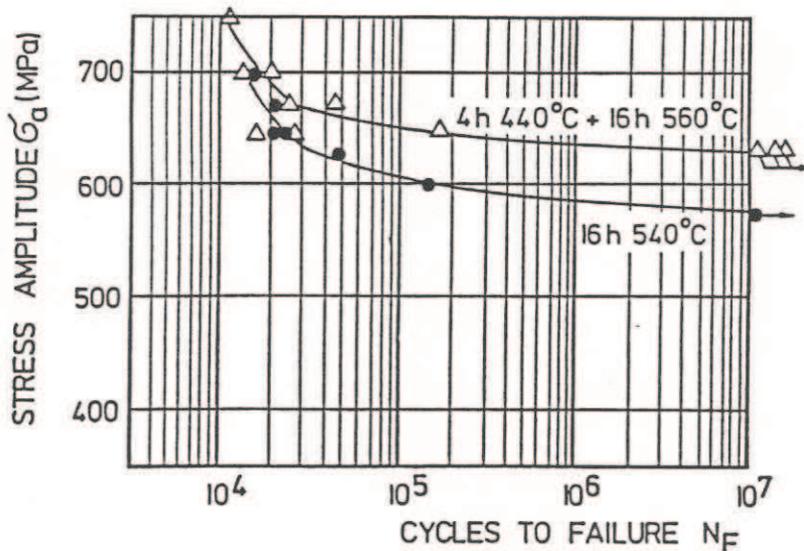


Fig. 8: S-N curves at R=-1 comparing the condition 16 h at 540 °C with 4 h 440 °C + 16 h 560 °C.

The influence of the  $\alpha$ -phase distribution on fatigue life can be seen in the S-N curves shown in Fig. 8. The superior behavior of the material with the pre-age of 4h at 440 °C can be explained by examining the crack nucleation mechanisms. Fig. 9 shows a crack nucleation site in a fatigue sample which had been aged 16 h 540 °C. Evidently, cracks can nucleate more easily in the precipitate-free regions.

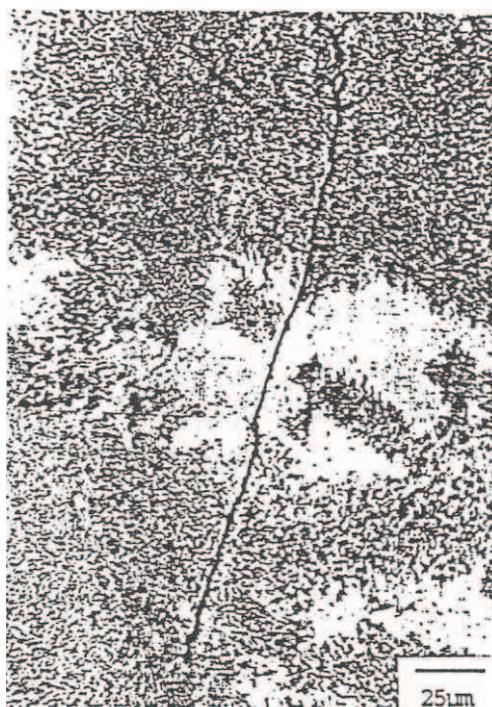


Fig. 9: Crack nucleation at precipitate-free regions for material direct-aged 16 h at 540 °C.

Fatigue crack growth tests were performed on CT-type specimens in air at 10 Hz at a load ratio of  $R=0.1$ . The resulting curves are shown in Fig. 10. Compared to the as-SHT condition,  $\alpha$ -aged Beta-C exhibits crack growth rates which are slightly higher (almost a factor of two), while  $\omega$ -aged Beta-C exhibits crack growth rates roughly a factor of two lower. The lower fatigue crack growth rates in the  $\omega$ -aged material are surprising in view of the extremely brittle nature of this condition. Since the high elastic modulus (Table 1) can only partly explain this comparatively high resistance to crack growth, crack closure effects are thought to be responsible for these lower crack growth rates. Salt water has

been shown to have no effect on the  $da/dN$ - $\Delta K$  curves for as-SHT and  $\alpha$ -aged Beta-C at loading frequencies of 10, 1 and 0.1 Hz [3]. The possibilities for influencing the  $da/dN$ - $\Delta K$  behavior in Beta-C are quite limited when compared with those which can be achieved in  $(\alpha+\beta)$  alloys such as Ti-6Al-4V, where significant variations in phase morphology can be induced [4].

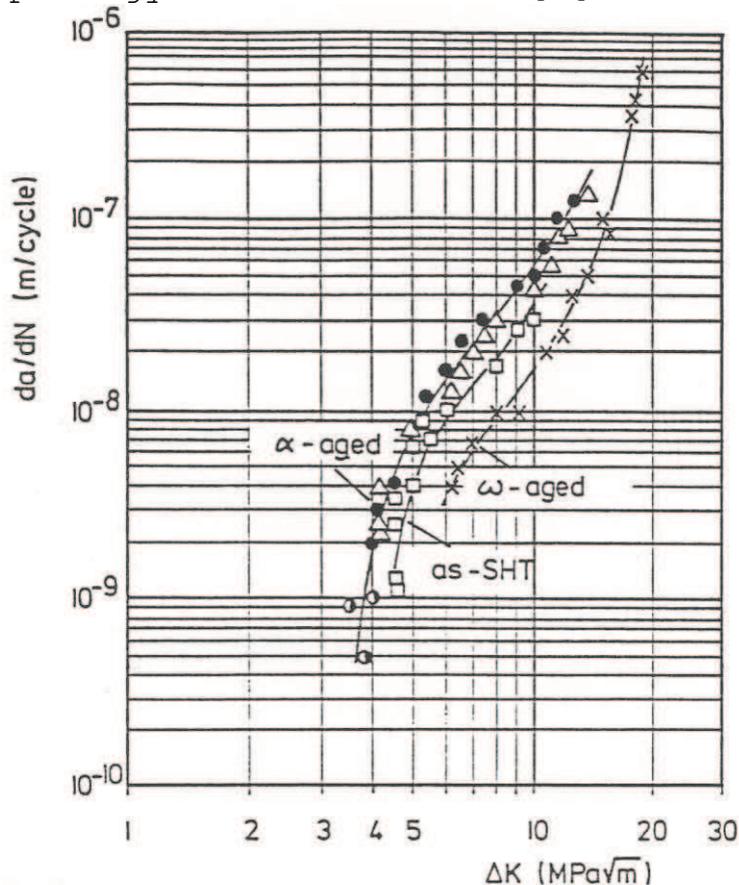


Fig. 10:  $da/dN$ - $\Delta K$ -curves for as-SHT,  $\alpha$ -aged, and  $\omega$ -aged Beta-C tested in air at 10 Hz, load ratio = 0.1.

### FRACTURE TOUGHNESS

Values for the fracture toughness  $K_{Ic}$  were measured according to the ASTM method E647 (with the exception that  $a/W = 0.6$ ). The highest fracture toughness was found for the as-SHT condition and the lowest for the  $\omega$ -aged (1000 h 250 °C) condition. As is shown in Fig. 11, fracture toughness increases with increasing ductility. Hardness, fracture toughness, and fatigue limits for the various microstructures are summarized in Table 2. For microstructures with inhomogeneous  $\alpha$ -phase distributions (as in Fig.3) two microhardness values are obtained, reflecting the difference in local properties of the

weaker precipitate-free regions (305 HV) and the stronger precipitate-containing regions (408 HV).

Table 2: Hardness, fracture toughness, and fatigue limit values for the microstructures investigated

Heat Treatment	Micro-hardness HV 0.025	Macro-hardness HB 2.5/187.5	K <sub>Ic</sub> MPa-m <sup>1/2</sup>	σ <sub>a107</sub> MPa
as-SHT	320	272	96	390
16 h 500 °C		342	70	500
16 h 530 °C		387	78	650
16 h 540 °C	305,408	365	84	575
4 h 455 °C + 16 h 555 °C		341	82	625
4 h 440 °C + 16 h 560 °C	385	349	86	625
1000 h 250 °C		396	22	--

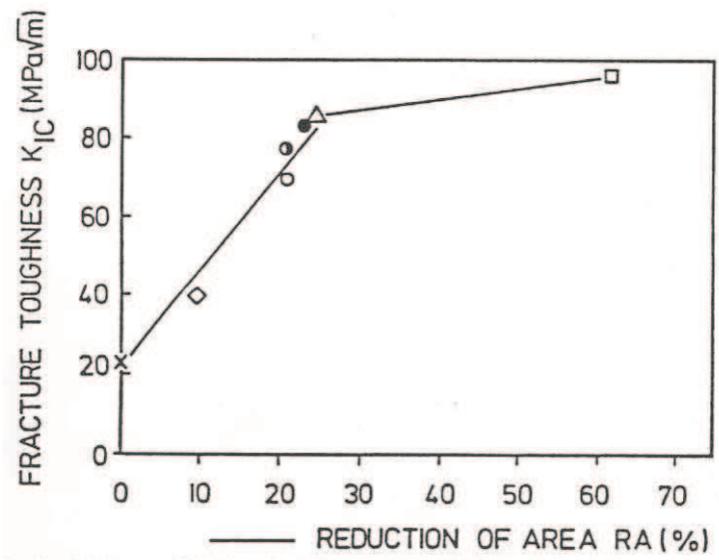


Fig. 11: Relationship between fracture toughness K<sub>Ic</sub> and ductility as assessed by reduction of area (RA).

For a given strength level, both the fracture toughness and the fatigue limit are higher in duplex annealed than in direct aged microstructures. While the higher fracture toughness of the duplex aged conditions is likely to be a result of the somewhat higher ductilities

(Table 1), the lower fatigue limit in the direct aged microstructures is thought to be a result of the early crack nucleation which occurs in the weaker precipitate-free regions (Fig. 9).

#### SUMMARY

For Beta-C, the highest ductility and fracture toughness are found in the as-SHT condition, which also exhibits the lowest yield stress and fatigue limit. Long term exposure (1000 h) of this as-SHT condition to temperatures of about 250 °C causes severe embrittlement, owing to the precipitation of the metastable  $\omega$ -phase.

After direct aging at temperatures between 500 -540 °C, precipitation of the  $\alpha$ -phase is inhomogeneous, leaving precipitate-free regions in a hardened matrix. These weak regions adversely affect fatigue strength through early crack nucleation in these areas.

Duplex aging results in a homogeneously precipitation-hardened microstructure. The absence of weak regions leads to fatigue limits superior to those of direct-aged material having the same yield stress, at no sacrifice in tensile ductility or fracture toughness.

Compared to ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys, fatigue crack growth rates cannot be markedly varied by altering the microstructure, presumably because no significant change in phase morphology can be brought about by heat treatment.

#### REFERENCES

1. H.J. Rack, in: Titanium '80 Science and Technology, ed. H. Kimura and O. Izumi, TMS-AIME, Warrendale, PA (1980) 1627-1636.
2. D.E. Thomas, in: Sixth World Conference on Titanium, ed. P. Lacombe, R. Tricot, and G. Béranger (les édition de physique) (1989) 147-152.
3. H.-E. Krugmann and J.K. Gregory, in: Microstructure / Property Relationships in Titanium Alloys and Titanium Aluminides, eds. R.R. Boyer and Y. Kim, TMS-AIME, Warrendale, PA (1991) in press.
4. G.W. Kuhlmann and A.K. Chakrabaty, in: Microstructure Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth

Rate in Titanium Alloys, eds. A.K. Chakrabaty and  
J.C. Chesnutt, TMS-AIME, Warrendale, PA (1987) 3-15.

THE MAIN PROBLEMS OF TITANIUM AND TITANIUM  
ALLOYS CIVIL APPLICATION  
DR. S.S.USHKOV AND DR. A.S.KUDRYAVTSEV  
CRISM "PROMETHEY", USSR

The twentieth century has been marked by the development of new materials like aluminium and titanium alloys, plastics etc. The Kroll method development opened the way for the industrial production of titanium.

At first, the most attractive feature of titanium alloys seemed to be high specific strength. From this point, titanium is highly efficient structural material for aviation and rocket-space technique. Later attention was drawn to high corrosion resistance of titanium in aggressive media including sea water.

CRISM "Prometey" has been performing investigations of titanium alloys as structural materials for marine purposes for many years. As we know from literature similar investigations have been carried out by many scientists from different countries e.i. USA, Great Britain, France, Germany, Sweden, Japan and others. The conclusions we made from our investigations are very similar to those of our foreign colleagues. In this brief paper we shall consider some aspects of titanium alloys application in ships engineering industry and national economy.

1. Titanium alloys possess high corrosion resistance in sea water and outperform all metals and alloys traditionally applied for marine conditions. But in the extreme conditions one can observe crevice corrosion and pitting.

2. The main factors of crevice corrosion and pitting to appear are as follows: high temperature (more than 70-120 C), high chlorides concentration (particularly local under salt deposits) and acidity (pH) of solution. The safe temperature range is up to 1000 C. Pronounced gain in crevice corrosion resistance is obtained after cathodic alloying (alloy Ti-0,2Pd).

3. Pitting corrosion of titanium in sea water is possible in exceptional cases: at high temperatures, under salt layer in crevices and when unsuccessful alloy composition is applied (High content of Al, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> etc).

4. Contact with other metals has no effect on titanium alloys corrosion resistance. For this reason, particular attention is to be given to the assurance of corrosion resistance of metals and alloys being in contact with titanium. It is necessary to set up isolating pads and protection where it is possible to decrease the level of corrosion of metals in contact with titanium up to the required level.

5. The least detrimental is the contact of titanium with austenitic stainless steel, silver, inconel (in sea water). Aluminium bronze shows low

sensitivity to contact corrosion. Tin bronze OTs10-2 Gunmetal type is applied in friction joints. This bronze is slightly corroding in contact with titanium.

6. Corrosion cracking phenomenon of titanium alloys in sea water is well known. Investigations carried out in the USSR and abroad have shown that a tendency to corrosion cracking is mainly dependent on the alloy composition. Technically pure titanium with oxygen content being less than 0,15%, alloys with aluminium content up to 3% and strength of less than 600 MPa are practically insensitive to corrosion cracking in sea water. Al (more than 6%) and Sn, Cr, alloying has a detrimental effect on corrosion mechanical strength of titanium alloys. Introduction of isomorphic betastabilizers: Mo, V, Nb, Ta is very useful especially Mo. Final heat treatment is of high importance for corrosion-mechanical strength.

7. Proper consideration of the particularities of titanium corrosion resistance in sea water, efficient alloys selection, service conditions regulation allow to take maximum advantage of the extremely high corrosion resistance of titanium alloys in marine conditions and reduce negative phenomena to a minimum.

8. The level of fatigue strength at multi- and low-cycle loading is considered to be the most important characteristic of metals used in machine building.

9. In this case the finishing operations of mechanical treatment are of high importance and surface plastic deformation (SPD) in particular. Various methods of SPD have been developed in the USSR. They include: rolling, sheet blasting, special treatment by needle strikers etc. The selection of proper method allows to use the high natural properties of titanium alloys in reference to fatigue failure resistance.

10. Titanium and its alloys show a tendency to fretting in the similar way as steels of the same strength level. Fretting is very hazardous for titanium alloys in corrosion medium for titanium loses its high corrosion resistance. In this case, the only method to improve titanium fatigue range is SPD.

11. Titanium alloys have low antifriction properties. For this reason titanium application in friction joints is possible only with surface hardening. In the USSR there are three main trends in surface hardening applied for antifriction properties improvement: fittings seal surfaces deposit by super hard alloys, thermal oxidation of friction surfaces and detonation coating by metals oxides and carbides.

12. Thermal oxidation is the most efficient and simple method for industry introduction. Two oxidation methods are proposed, namely: "high temperature" and "low-temperature". At low-temperature oxidation the heating is conducted at  $T < 800$  C during some hours followed by furnace cooling. For these conditions alloys without additional elements are suitable for they

give loose seals. As a result of this treatment the hardened alloy 10-60 mkm in thickness is formed on the surface.

High-temperature oxidation is accomplished at  $T > 800$  C during some hours followed by water cooling. It is possible to perform oxidation in graphite. In this case graphite is workingscale-forming decreasing medium, and what is more important makes it possible to increase the depth of oxidation layer and allows to use alloys with vanadium.

There is no need for any finishing operations on oxidated parts. Only paste polishing is possible with layer removal up to 5 mkm.

12. Account must be taken of changes in structural strength (its decrease) under the effect of surface hardening while using titanium alloys in oxidated state. Oxidation of low-alloyed alloy (Ti-4,5Al type) is decreasing long-term strength of alloy at tension and bending very little by 10%. The effect of sea water is also very low. High-strength alloying titanium alloys application in oxidation state in sea water is considered to be unefficient in these cases due to the fact that their corrosion-mechanical strength is decreasing pronouncely (2 times).

13. In cases when thermal oxidation or deposit do not give desired anti-friction properties detonation coatings is used. For detonation coatings equipment with the following characteristics has been developed:

- shooting rate, shot/s 3-5
- coating thickness for one shot, mkm 3-20
- spraying spot, mm 20-40
- productivity (for one shift)
  - a) of sprayed material, kg/hour 1-5
  - b) of area,  $m^2$ /year 200-600
- working media consumption (oxygen + acetylene),  $m^3$ /hour 1,0-4,5

We have assssimilate experience in application of oxide, carbide, metallide and combined coatings. Oxide coatings (a  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ZrO_2$  and their mixtures) possess absolute corrosion resistance in sea water and high erosion-cavitation resistance. They may be used for work under the friction conditions in sea water at specific pressures up to 20 MPa (short-term up to 40 MPa) alone and with OTs10-2 bronze. Detonation coatings practically have no effect on mechanical properties of the part, except the fatigue limit which decreases by 20-30 %.

Carbide and metallide-base coatings have the better carrying capacity and endurance (on wear) but their application in sea water is limited by not high corrosion resistance. These coatings are performing well only in unaggressive media.

Qualifying the detonation coatings it is necessary to point out the fact that they have allowed to increase the service life of parts for machine building - especially friction joints by 2-3 times.

14. At present the "Prometey" institute possesses a set of technical and technological documentation and production technologies for titanium semi products and products including the rolling of sheets, tubes, profiles; forging, wire drawing, stamping, shape casting, welded structures, manufacture and the documentation on the special problem of tribo-technique - detonation, plasma, and laser coatings which exhibit a set of unique physico-mechanical properties.

Available are industrial opportunities to manufacture the pilot and common structures using the methods mentioned above and accumulated technical potential. Mainly they include pipe-line systems, fittings, pumps, tanks to store electrolytes, reactors pressure vessels, metallurgical high-resistant titanium crucibles for melting and holding of food aluminium alloys, heat exchanges, centrifuges and separators etc.

15. We consider titanium alloys promising for application in food industry equipment, particularly for the production of juices, wine, milk, meat etc. Were corrosion is impermissible not only from the point of equipment safety but for sanitary-hygienic reasons.

In the majority of mentioned technological media titanium alloys exceed traditional chrome-nickel-stainless steels in resistance, they do not content impurities noxious for food as lead, arsenic, zinc and berillium and undoubtedly may be applied for mentioned equipment.

Titanium alloys have found a wide application in medical technique as for medicinal drugs so for the production of dentures and implants.

In conclusion I would like to show photos - slides as examples of our production:

- foils
- bleaching towers
- shape coating
- bellows
- springs
- heat exchanges
- jewelry

VII INTERNATIONAL MEETING ON TITANIUM

CONSIDERAZIONI SUL PROCESSO  
DI FORGIATURA SUPERPLASTICA

Ettore Alunni  
Fucine Umbre S.r.l. (Italia)

## CONSIDERAZIONI SUL PROCESSO DI FORGIATURA SUPERPLASTICA

La superplasticità è uno stato fisico caratteristico dei materiali metallici, intermetallici e ceramici; nello stato superplastico i suddetti materiali hanno la capacità di sopportare inusuali deformazioni plastiche senza la formazione di zone strizionate o di vuoti.

Questo fatto è di grandissima importanza in quanto l'aumento della duttilità, dovuto alla drastica caduta della resistenza allo scorrimento plastico del materiale durante il processo superplastico, permette di sviluppare nuove tecnologie per la produzione di componenti massicci, critici sotto diversi punti di vista, utilizzando leghe commerciali.

Solo i materiali caratterizzati da un'elevata sensibilità della resistenza allo scorrimento rispetto alle variazioni della velocità di deformazione possono presentare un comportamento superplastico.

La formula che lega i parametri di cui sopra è:

$$\sigma = K(\dot{\epsilon}')^m \quad (I)$$

dove:

$\sigma$  = resistenza allo scorrimento

$K$  = costante caratteristica del materiale

$\dot{\epsilon}'$  = velocità di deformazione reale

$m$  = sensibilità alla velocità di deformazione

PAGINA MANCANTE

deformazione torsionale sotto pressione e forgiatura multiassiale;

- 2) la compattazione di nanocristalli (polveri)
- 3) trattamenti termici in presenza di trasformazioni di fase.

I materiali aventi grani superfini ( $<10 \mu\text{m}$ ) acquistano elevate caratteristiche meccaniche come massima resistenza ed allungamento a rottura, plasticità, abbassamento della temperatura di transizione fragile-duttile ed il miglioramento delle caratteristiche è ancora più evidente riducendo ulteriormente la grandezza del grano.

Inoltre si è sperimentato che la riduzione del diametro del grano da  $10$  a  $0,3 \mu\text{m}$  migliora notevolmente le condizioni di forgiatura superplastica permettendo un abbassamento della temperatura di processo di  $200^\circ\text{C}$  circa ed un aumento della velocità di deformazione a  $0,01/\text{sec}$ .

La foto 1 è relativa ad una paletta del compressore di un turbo-propulsore realizzata in una lega di titanio per via superplastica (stampato di precisione).

Dalla macrografia (foto 3) e dalla composizione micrografica tridimensionale (foto 4) si evidenzia l'assenza di ogni tessitura ed il fatto che si è in presenza di una struttura uniforme a grano fine ( $<10 \mu\text{m}$ ) e ciò anche se il massello di partenza è stato sottoposto, lungo il volume da esso occupato, a livelli di deformazione molto diversi fra loro.

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche delle palette in superplastico è dovuto appunto alla specifica microstruttura ottenibile durante il processo superplastico.

I particolari prodotti per via SPD possono essere sottoposti a trattamenti termici di indurimento (invecchiamento) senza preliminari trattamenti di ricottura (solubilizzazione) in modo da ottenere proprietà meccaniche conformi alle richieste di progettazione.

Nell'ultimo decennio con il processo SPD sono state prodotte palette a geometria complessa e dischi per turbopropulsori e turbogeneratori, giranti per turbocompressori, corpi cilindrici cavi con notevoli variazioni di sezione lungo il profilo e protuberanze laterali orientate su piani diversi, cerchioni di ruote per carrelli d'atterraggio, componenti strutturali in genere per l'industria aeronautica ed elicotteristica, ecc. ecc.

Per dare un'idea sulle dimensioni delle palette prodotte possiamo citarne una lunga 350mm, larga 100mm con un angolo di svergolamento di 60°.

Da quanto detto risulta che la tecnologia SPD è un metodo molto flessibile candidato a produzioni industriali di componentistica avanzata con le seguenti caratteristiche migliorative rispetto alla tecnologia convenzionale:

- drastica riduzione del materiale occorrente per realizzare un dato particolare;
- componenti prodotti con una geometria vicina a quella finale di utilizzazione con conseguente riduzione delle lavorazioni meccaniche valutabile dal 40% al 60%;
- più elevate caratteristiche meccaniche e maggiore affidabilità dei componenti prodotti.

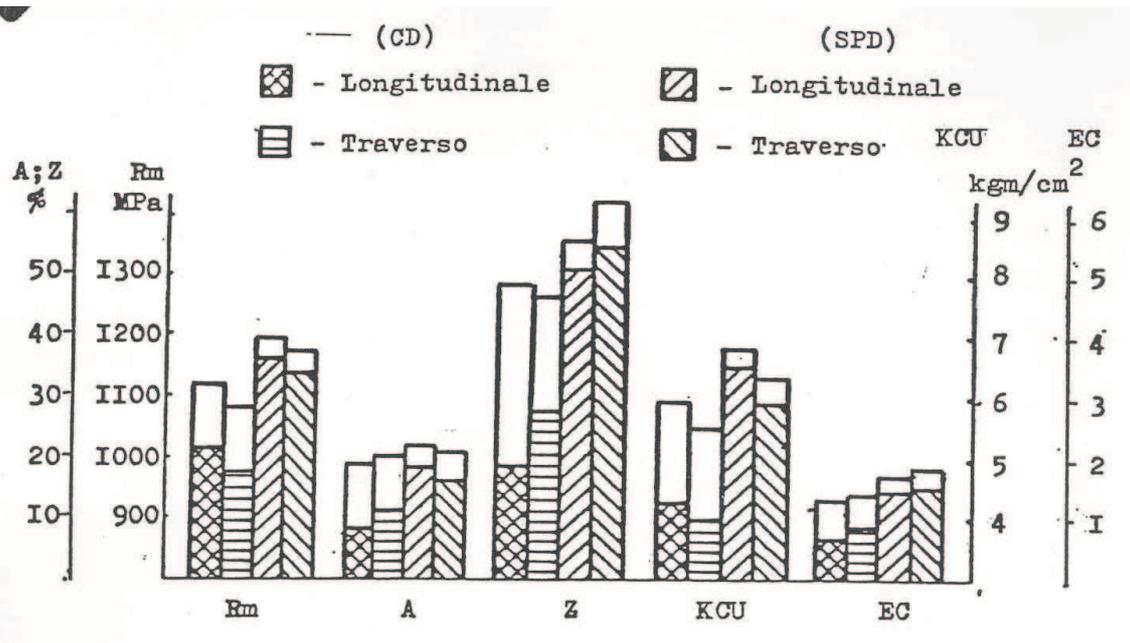


Fig. 1 - Confronto delle caratteristiche meccaniche di palette fabbricate con una lega Ti,Al,Mo,Cr,Si,Fe per via convenzionale (CD) e per via superplastica (SPD).

- A: Allungamento
- EC: Resistenza preintagliata
- Rm: Resistenza a rottura
- KCU: Resistenza charpy U
- Z: Strizione

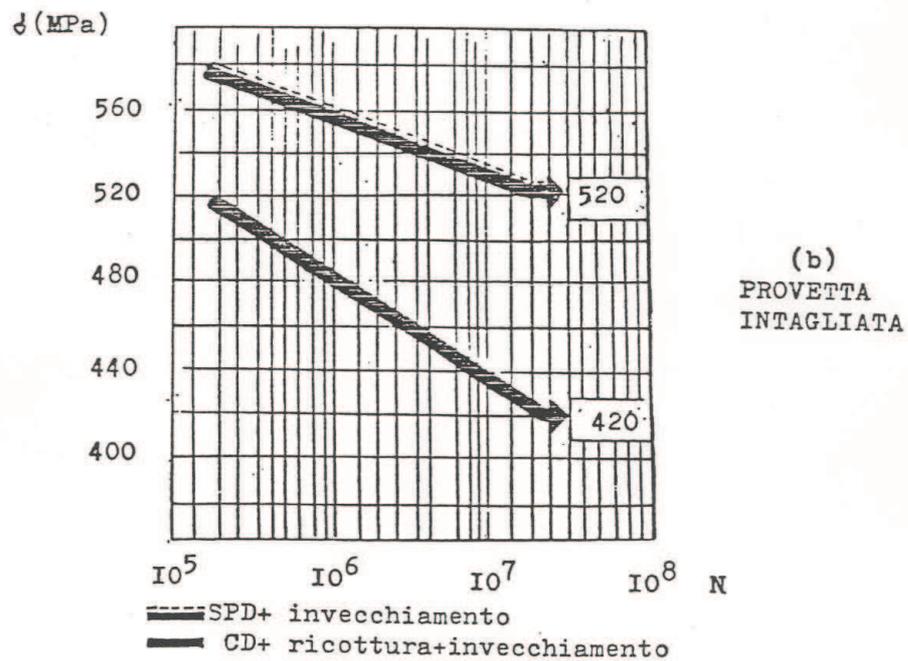
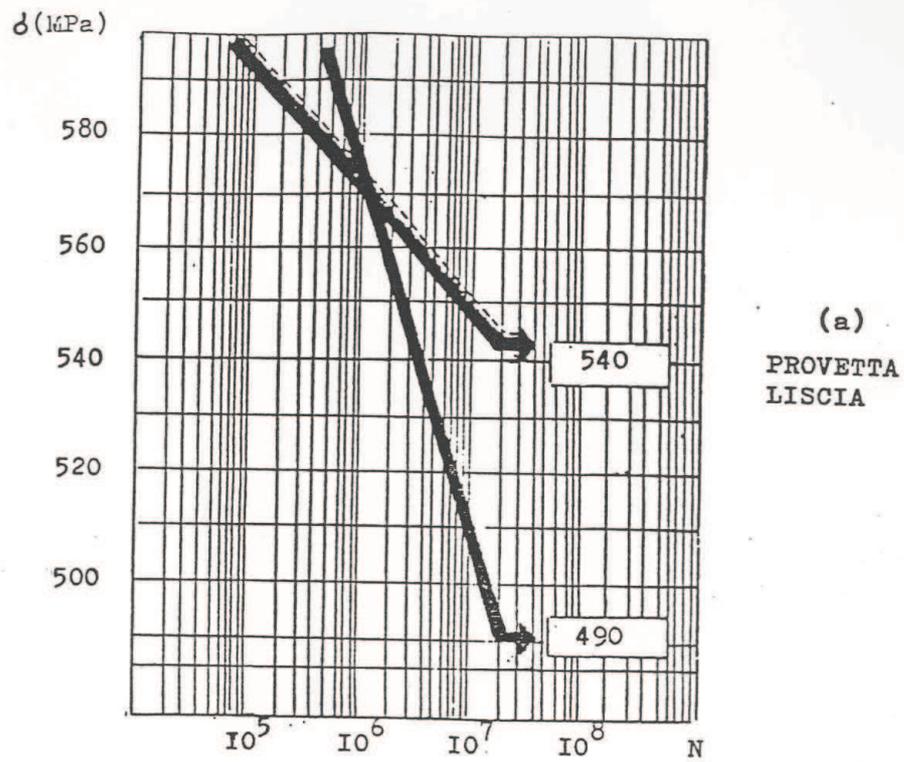


Fig. 2 - Confronto delle prestazioni alla fatica classica ed oligociclica di palette fabbricate in una lega di Titanio Ti,Al,Mo,Cr,Si,Fe, per via convenzionale (CD) e per via super plastica.

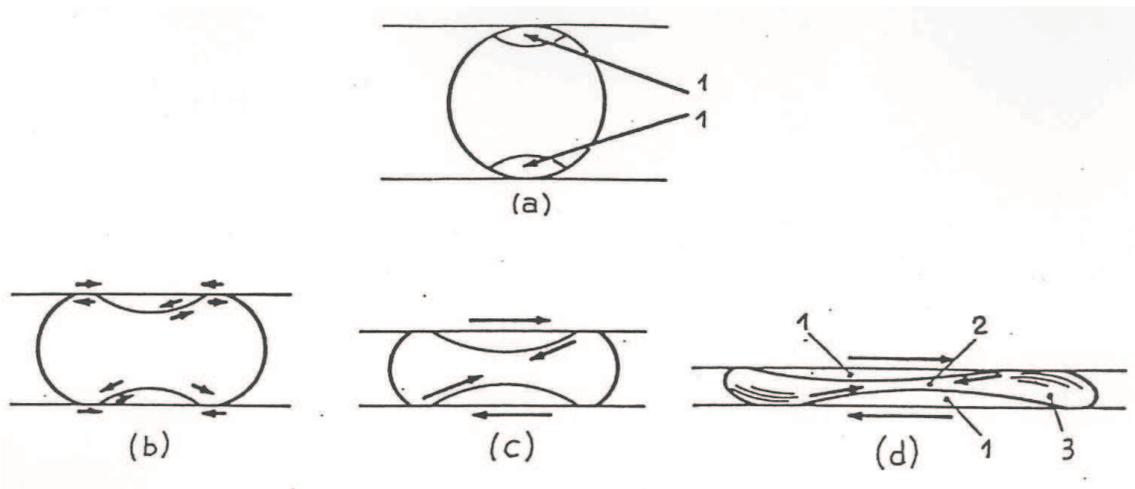


Fig. 3 - Schematizzazione della formazione della banda di taglio su uno sbizzato in titanio ottenuto con il processo convenzionale.

1) Zone "bloccate" causa di raffreddamento per conduzione provocato dal contatto con i piani di lavoro.

2) Banda di taglio.

3) Zona deformata.



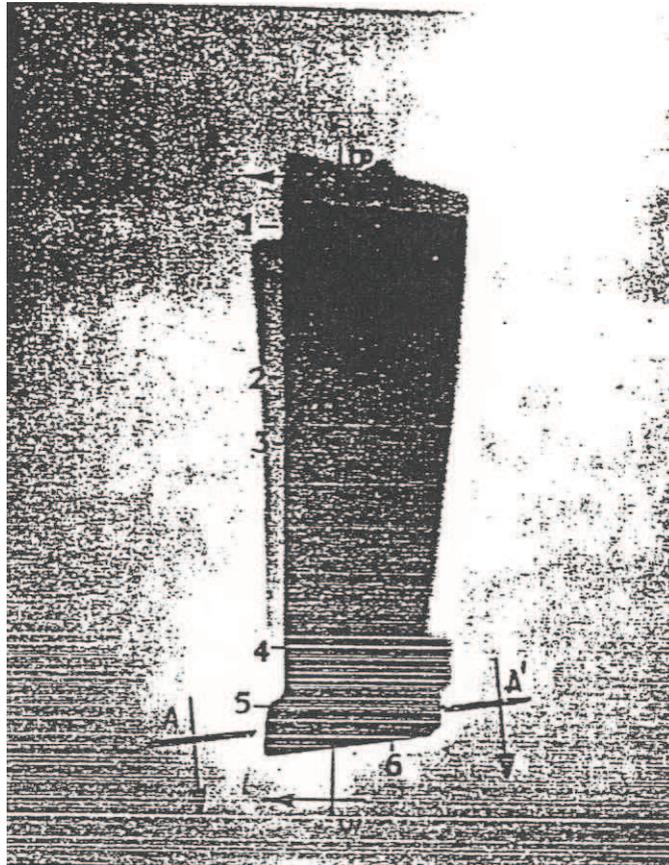
NEG. 0030

FOTO 1 - Prospetto della paletta.

Lunghezza totale	205 mm
Corda	70 mm
Spessore foglia	1,5 mm
Svergolamento	45°
Peso	0,300 kg

COMPOSIZIONE CHIMICA

Al 5,5-7%; Mo 2,0-3,0%; Cr 0,8-2,3%  
Si 0,15-0,40%; Fe 0,20-0,70%; Ti Resto



NEG. 0031

X 1/3

FOTO 2 - Schema di sezionatura della paletta per esami macro e micro.

Sez. B-B' per esami micrografici, e precisamente:

parte 1: sez. trasv.

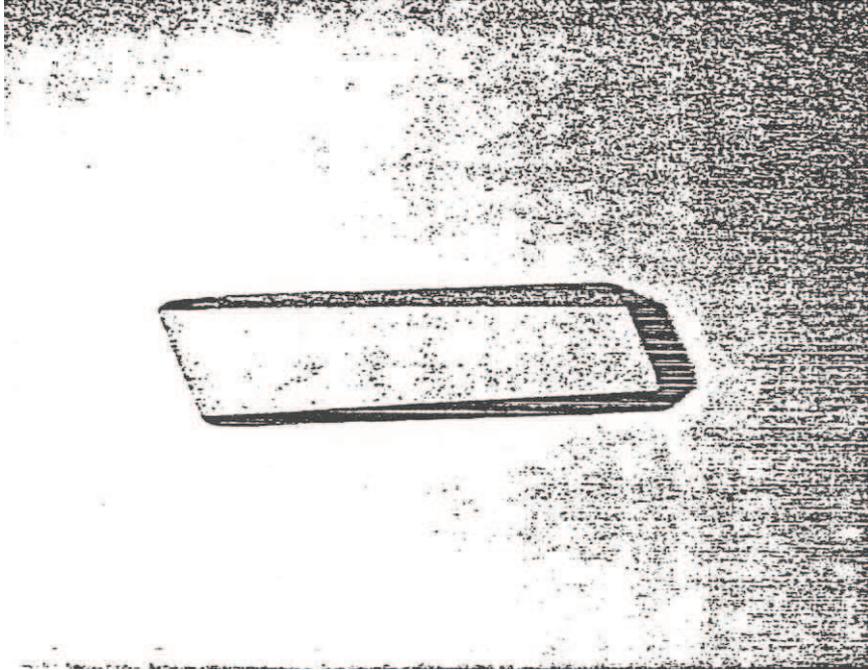
" 2: " long. sul ringrosso

" 3: " long.

" 4: " superficiale

" 5: " raccordo piede

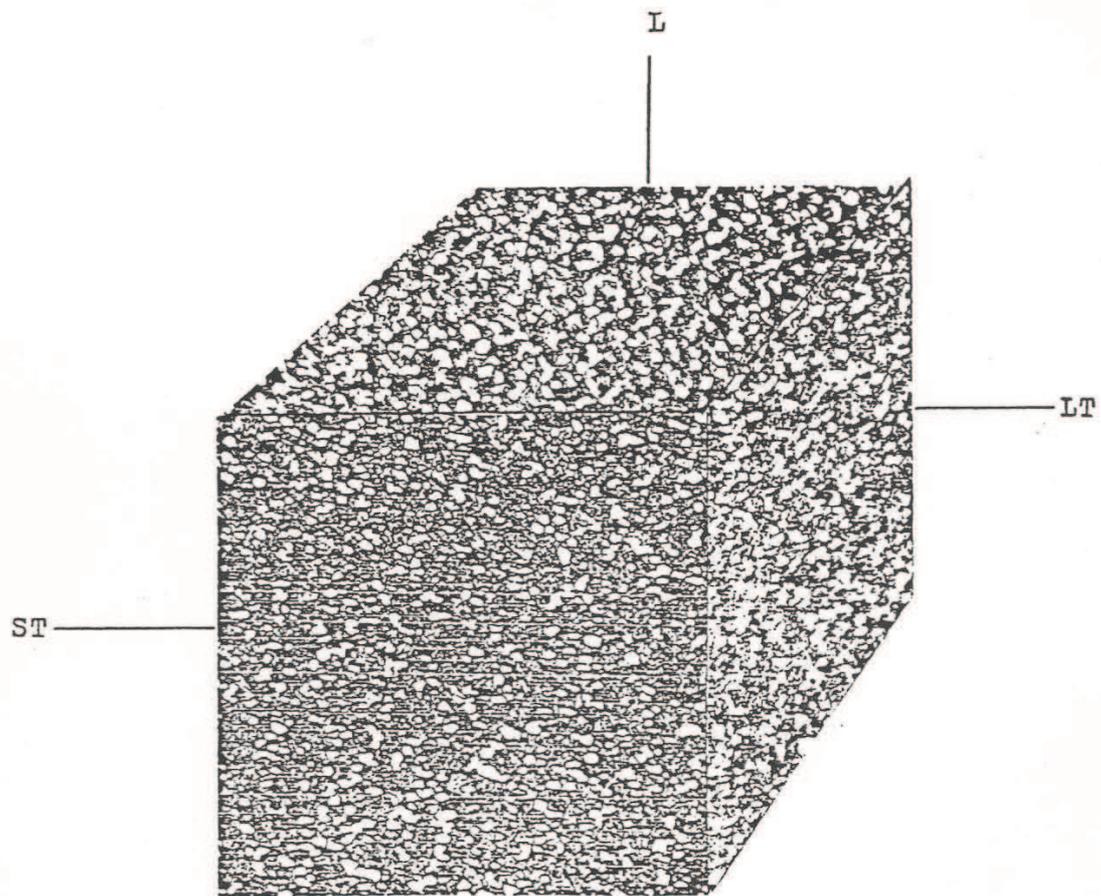
Sez. A-A' per esame macrografico, parte 6



NEG. 0032

X 1

FOTO 3 - Macrografia parte 6.



NEG. 0033; 0034; 0036

X 500

FOTO 4 - Rilevamento della struttura nelle tre  
direzioni: Long. parte 4; Trasv. parte 1 e  
superficiale parte 4.

VII INTERNATIONAL MEETING ON TITANIUM

TITANIUM-STEEL EXPLOSION BONDED CLAD PLATES

Jean Paul Winsky  
Nobel Explosifs (Francia)

## INTRODUCTION

A clad plate is a composite of 2 or more plates joined together in a continuous manner by a true metallurgical bond.

However, due to metallurgical limitations between materials or to the dimensions of the final product, some plates cannot be bonded by conventional techniques.

In these cases, explosion cladding is the only commercial technique available since it has theoretically no limitations at all. Said technique has been used for more than 25 years to produce large Titanium steel clad plates, for example.

Usually, for fabrication purposes, the base metal offers the strength and low cost of one metal. It can be either rolled or forged and is more often normalized low carbon steel. But it may also be high strength steel or stainless steel (Fig. I).

The cladding metal, the more expensive one and therefore the thinner one, is selected for its corrosion resistance properties. It may be stainless steel, copper, nickel and alloys there of, aluminium or even more noble metals such as Titanium, Zirconium or Tantalum (Fig. II).

Although explosion cladding process is now 30 years old, it is not yet widely known by the public. Our purpose today is to give you a general idea of how the process works and show you typical properties of explosion bonded clad plates. We will end with a few words on cost effectiveness. To do so, we will consider Titanium-Steel clad plates only.

## Cladding technology

In explosive cladding technique, true metallurgical bond is achieved between the 2 plates by detonating an even layer of explosive placed on top of the assembly.

As shown on figure III, the cladding metal is originally positioned parallel but at a slight distance above the backing metal. The assembly is then covered by a layer of explosive which is detonated from one point located usually on one edge of the assembly.

Figure IV illustrates what is happening during the process: the cladding metal is propelled across the standoff space by the detonation and a jet emanates from the collision point which results from a plastic flow of the metal surfaces slightly ahead of this point. The jet carries with it impurities and surface films that normally prevent bonding.

When all of the parameters - standoff-velocity and quantity of explosive - are properly controlled a weld interface of the type shown in figure V is obtained.

### General characteristics of explosion bonding

Explosion bonding main characteristics are:

- a wavy interface which increases several times the surface of contact between the 2 metals.
- the fact that the bond is obtained at room temperature without any heat effect
- hence, almost any metal can be made into clad plates.
- bonding is achieved under very high pressure and high deformation velocity. Therefore, the 2 metals do not flow and there is no noticeable change of their dimensions.

### Mechanical characteristics

After bonding, NOBELCLAD Titanium clad plates are heat treated to stress relieve the materials (Holding temperature: 540 °C for 2 hours per inch of thickness with a maximum of 6 hours), then flattened if necessary and controlled.

More common control consists of an ultrasonic inspection according to international standards (ASTM - SEL or AFNOR) to check the integrity of the bond. Shear tests and if required tensile tests or bend tests, are also performed.

Typical values are given in figure VI. These tests quantify the bond strength of the plate well above ASTM recommendation of 140 MPa.

#### Dimensions of clad plates

Theoretically, explosion cladding has no size limits. In practice, there are some restrictions such as weight of plates or quantity of explosive. However, the main one is the dimensions of Titanium sheets available. To overcome this, NOBELCLAD has developed the explosive cladding of prewelded sheets and does produce plates up to 20 m<sup>2</sup> as daily routine.

Typical Titanium thicknesses range from 2 to 12 mm.

#### Heat effect

Fabrication often calls for processes - forming, deep drawing, welding - where plates are to be heated.

Since explosion bond is a direct metal to metal one, heat may generate a diffusion at the interface which in turn may cause the formation of intermetallic compounds, brittle and fragile.

In order to show the quality of NOBELCLAD Titanium clad plates, we have taken out a sample on a plate from commercial production (Fig. VII). Mechanical characteristics of both components are given in Fig. VIII.

Fig. IX, X and XI state the various heat treatment we have performed and, for each one, results of bend tests and shear tests.

There results show clearly that the diffusion phenomenon does exist for Titanium clad plates but starts at temperatures high enough to enable the usual fabrication processes, provided temperature is carefully controlled.

Based on above study, we have had 2 heads - one hemispherical and one elliptical - made with success (Fig. XII). Fig XIII shows a micrograph after forming.

By optimizing the hot rolling conditions, it has been possible to obtain explosion + hot rolled Titanium clad plates. After treatment, these "bang and rolled" plates present shear strength values slightly below the direct bond values but still over 140 MPa.

#### Applications

Titanium clad plates are used in industrial applications like marine heat exchangers, nuclear condensors, chemical reactors, strippers, etc... (Fig XIV-XV). A less conventional application is found in electrical transition joint where Titanium is used as a barrier between aluminium

and steel to prevent diffusion.

The explosion cladding technique is of course rather expensive but can also cut the price down. The thicker the material is, the more effective the clad plate is.

For thinner gage, the "bang and roll" technique can also be an alternative.

## CONCLUSIONS

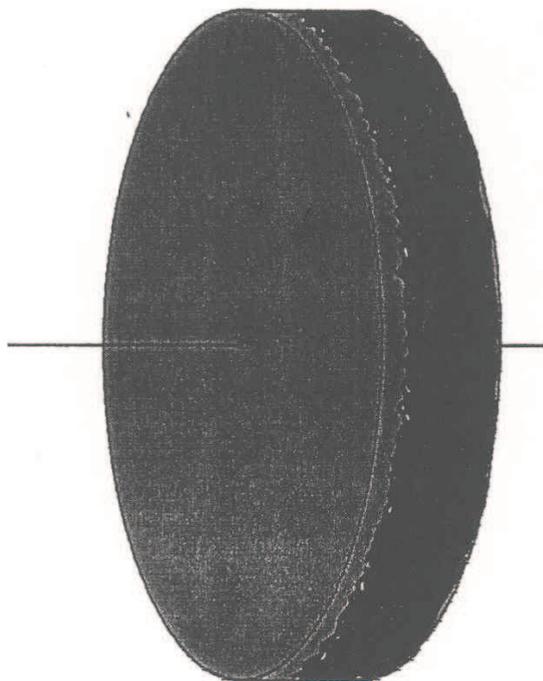
Explosion Titanium clad plates have been used all over the world for more than 25 years with excellent results.

Today, mastering the prewelded sheets cladding or the "bang and roll" technique allow you to get larger plates.

This makes Titanium clad plates even more attractive, by reducing the cost of forming and welding procedures.

Research programs are still going on and tomorrow we should offer wider range of thicknesses larger plates, new materials as well as new shapes.

**nobelclad**



Hemispherical head : dia. 380 mm

Elliptical head : dia. 300 mm

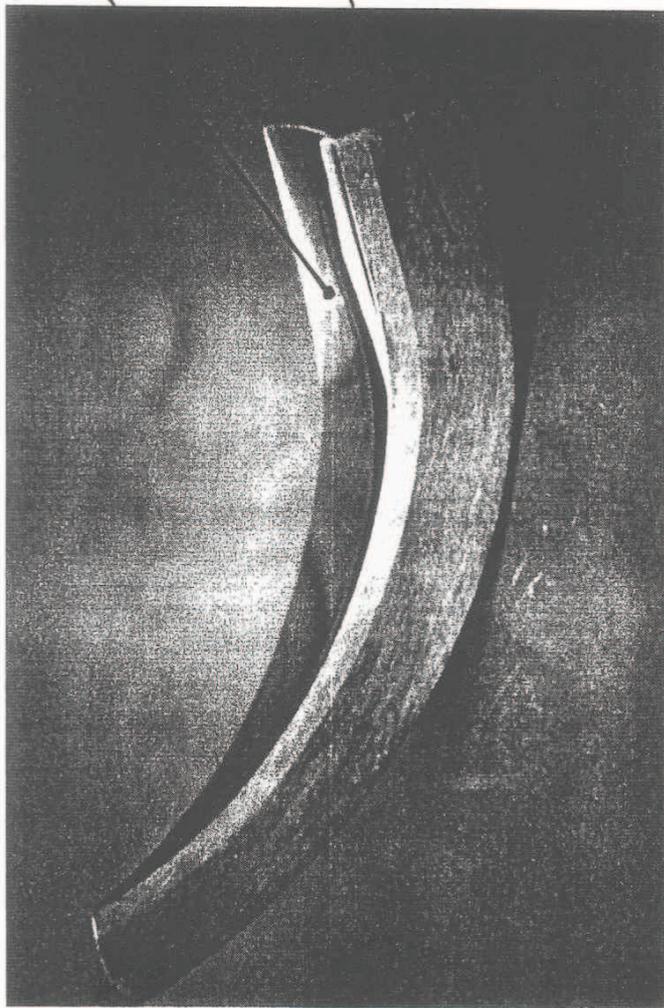
**Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**

**Blank for deep-drawing test**

a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of

**SNPE**  
MATERIALS

**nobelclad**



**Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**  
**Hemispherical head part**

a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of



**nobelclad**



**TITANIUM**

**STEEL**

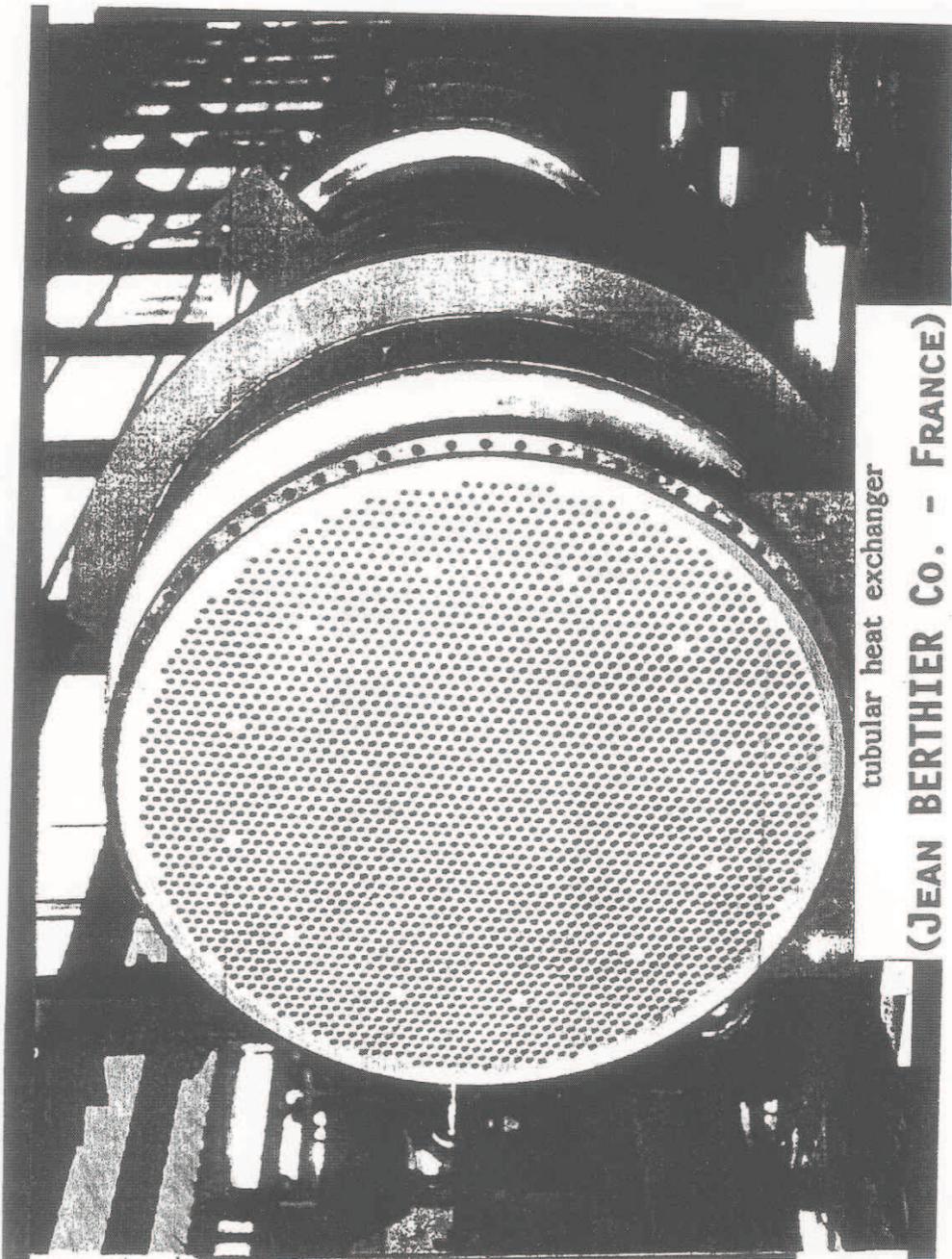
## **Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**

**Explosive welding area from  
hemispherical deep-drawing**

a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**SNPE**  
MATERIALS

**nobelclad**



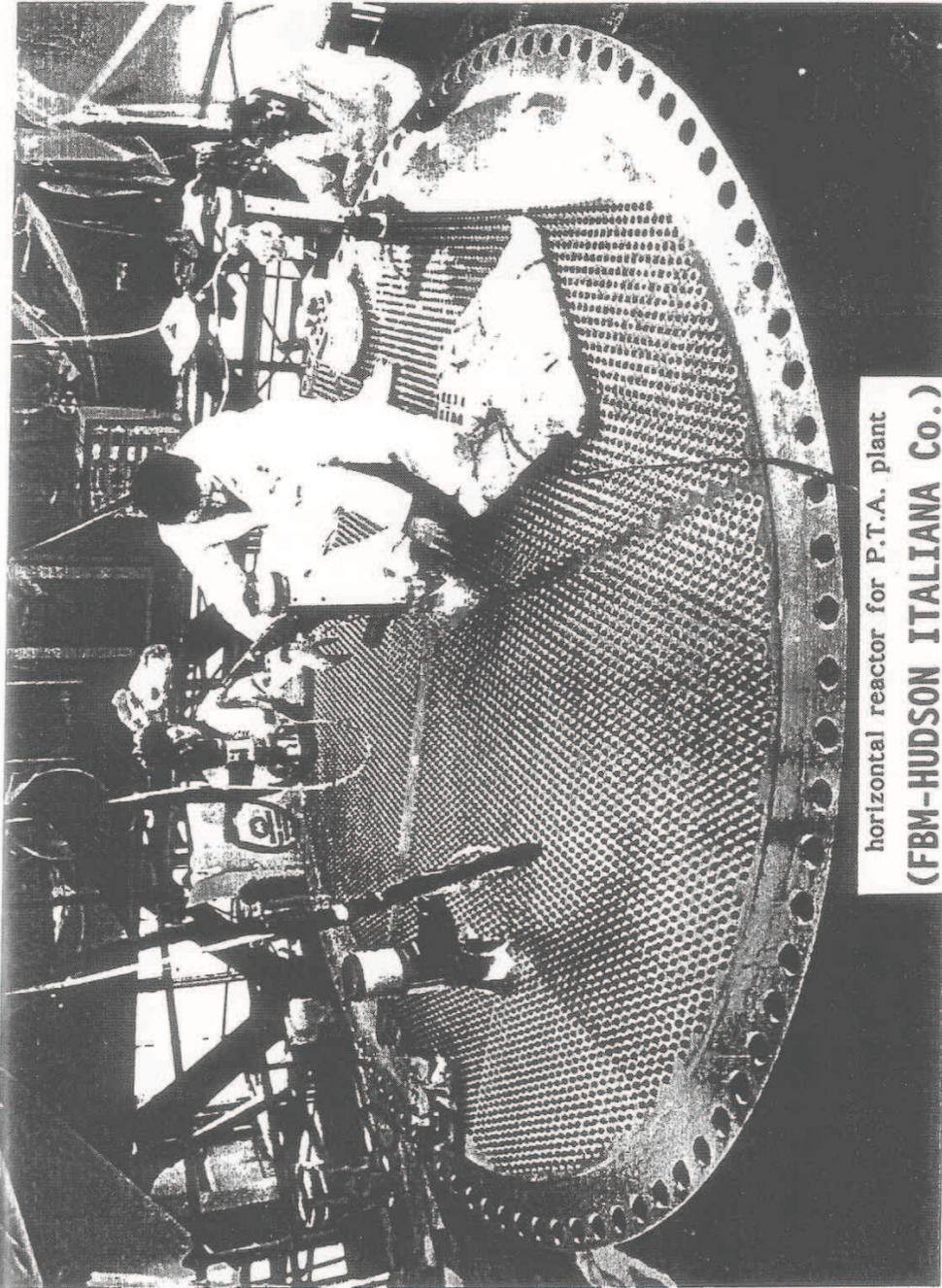
tubular heat exchanger

**(JEAN BERTHIER CO. - FRANCE)**

a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of



**nobelclad**

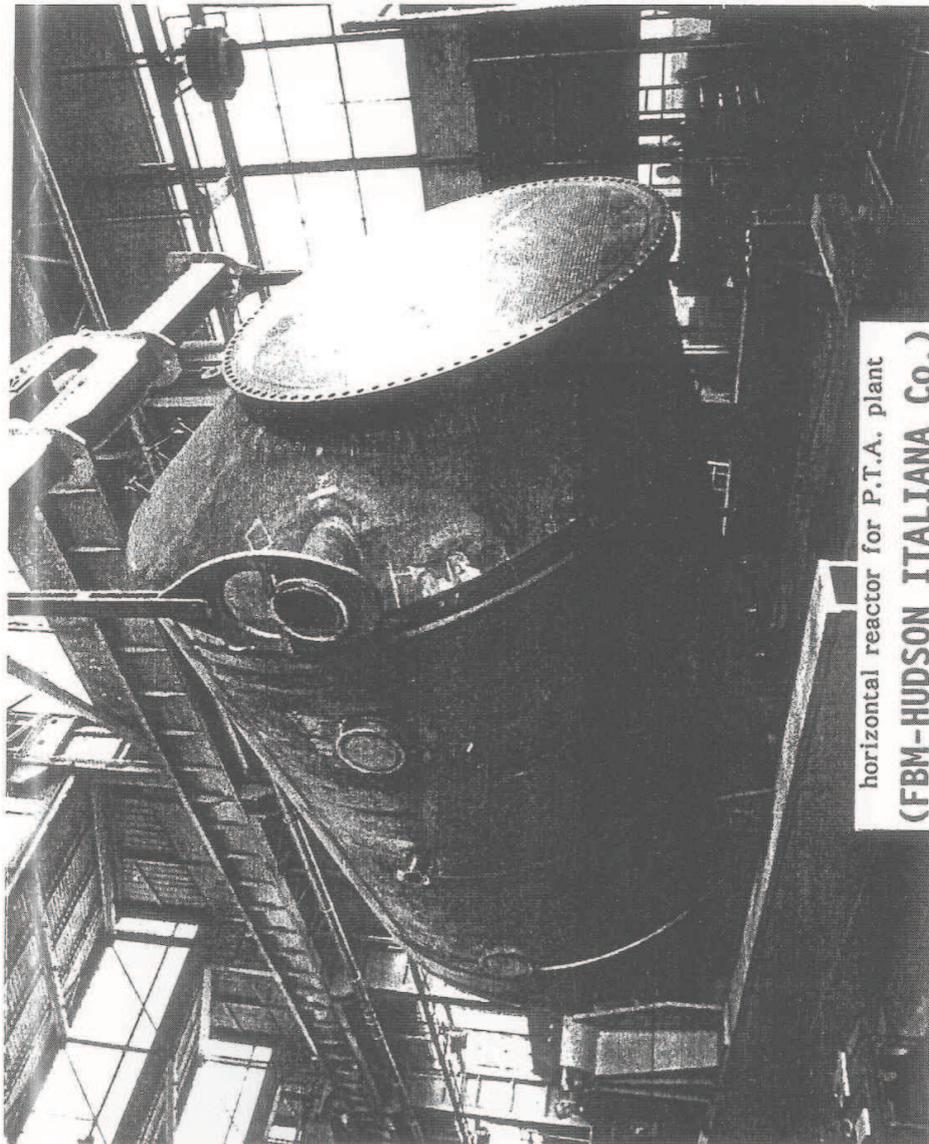


horizontal reactor for P.T.A. plant  
(FBM-HUDSON ITALIANA Co.)



a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of

# nobelclad



horizontal reactor for P.T.A. plant  
(FBM-HUDSON ITALIANA Co.)



a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of

...

**nobelclad**

Ref.	temp. (° C)	time (min)	Shear strenght (MPa)
A	540	120	21/20
B	A + 650	15	21/20
C	B + 700	15	22
D	C + 750	15	20
E	D + 800	15	19/20
F	A + 800	30	19
G	F + 850	30	18
H	G + 875	30	15
I	H + 900	30	12/13

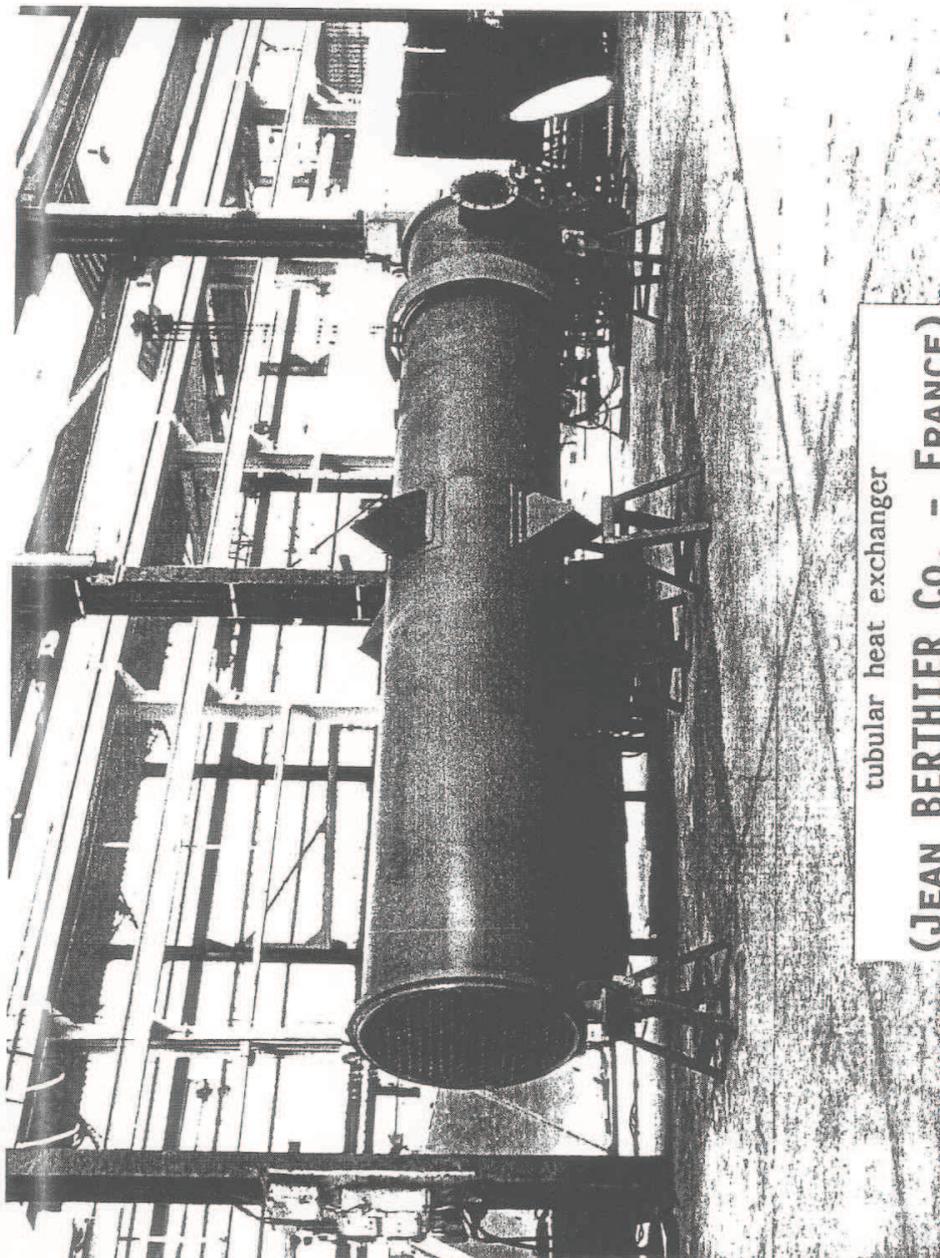
## Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING

### Shear test results



a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**nobelclad**



tubular heat exchanger  
**(JEAN BERTHIER Co. - FRANCE)**



a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of

## **nobelclad**

- Titanium (gr. 1, 2, 7, 11)
- Stainless steel (austenitic, ferritic, duplex)
- Copper and alloys (Cu-Ni, Cu-Al, Naval Brass, Muntz Metal)
- Nickel and alloys (Inconel<sup>®</sup>, Monel<sup>®</sup>, Incoloy<sup>®</sup>, Hastelloy<sup>®</sup>)
- Aluminium and alloys ( 1000, 5000, 6000 std )
- Zirconium
- Tantalum
- Silver

## **EXPLOSIVE METALCLADDING**

**Cladding metals in today mass production**



a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

## **nobelclad**

- Carbon manganese steel
- Cr Mo alloyed steel
- Mo and Mn Mo alloyed steel
- Ni alloyed steel
- High yield steel
- Quenched and tempered steel
- Stainless steel
- Armour steel
- Aluminium and alloys

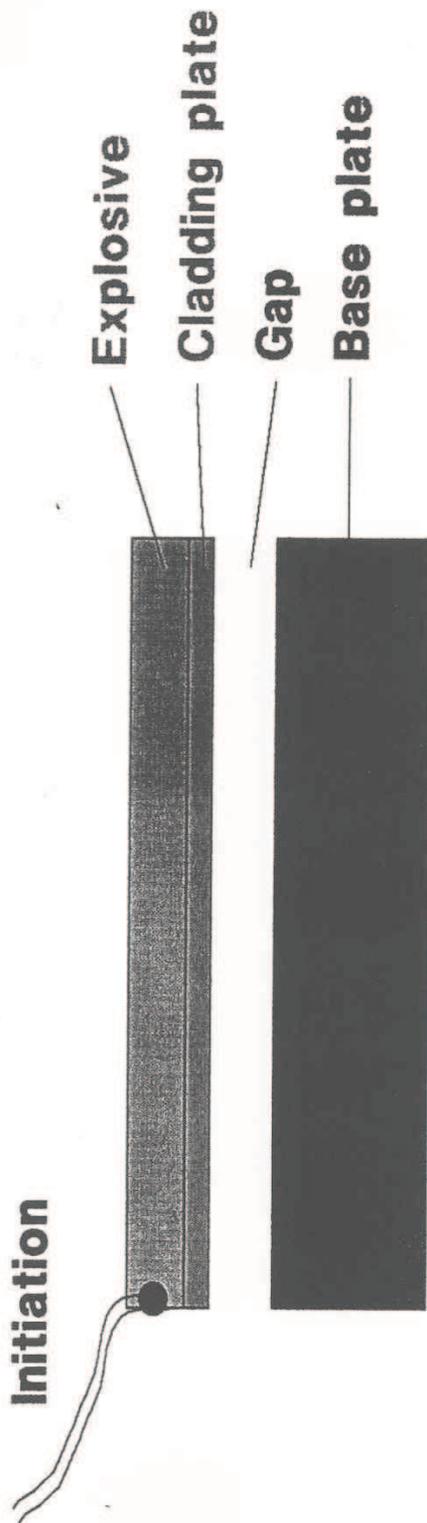
## **EXPLOSIVE METALCLADDING**

**Base metals in today mass production**

a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of



**nobelclad**

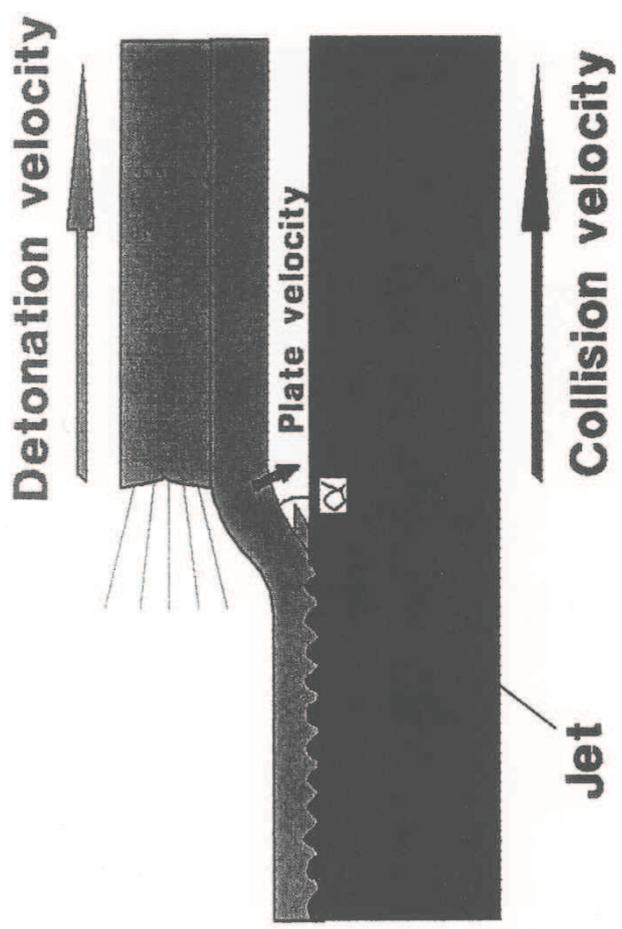


# **EXPLOSIVE METALCLADDING Arrangement**

a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of



# nobelclad



## EXPLOSIVE METALCLADDING Cladding phenomenon



a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**nobelclad**



**TITANIUM**

**STEEL**

**Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**  
**Explosive welding area**

a division of **NOBEL EXPLOSIFS FRANCE**, subsidiary of

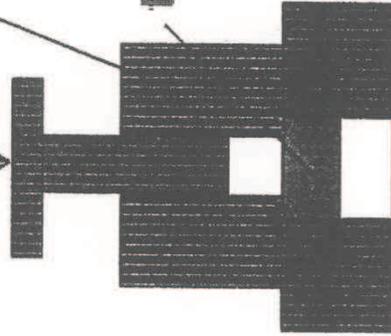


# **nobelclad**



**F**  
↓

steel



Tensile test

**F**  
↓



titanium

Shear test  
(ASTM A 265)

180/250 ← tensile strength (MPa) → 200/300

Typical values for Ti/Fe clad plate

## **EXPLOSIVE METALCLADDING**

### **Mechanical tests**

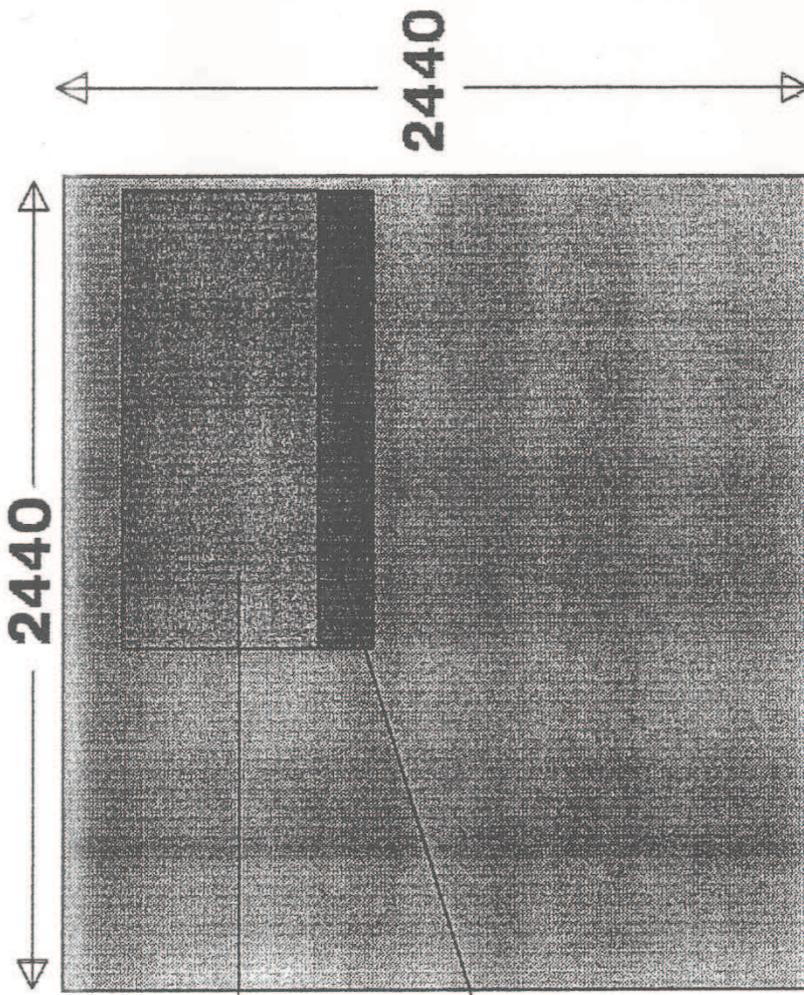
a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of



**nobelclad**

**Sampling area  
for bend tests**

**Sampling area  
for shear tests**



## **Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**

### **Sampling areas**



a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**nobelclad**

	Metal (ASTM Std)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Cladding plate	Titanium B265 gr. 1	253	324	33
Base plate	Steel A515 gr. 60	313	473	29

## **Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING Plates mechanical characteristics**



a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**nobelclad**

Ref	temp. (°C)	time (min)
A	540	120
B	A + 350	15
C	B + 700	15
D	C + 750	15
E	D + 300	15
F	A + 300	30
G	F + 350	30
H	G + 375	30
I	H + 900	30

## **Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**

### **Thermal conditioning**

a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of

**SNPE**  
**MATERIALS**

**nobelclad**

Ref	temp. (°C)	time (min)	Results dia. 50	Results dia. 100
A	540	15	GOOD	GOOD
B	A + 650	15	GOOD	GOOD
C	B + 700	15	GOOD	GOOD
D	C + 750	15	GOOD	GOOD
E	D + 800	15	GOOD	GOOD
F	A + 800	30	GOOD	GOOD
G	F + 850	30	GOOD	GOOD
H	G + 875	30	GOOD	GOOD
I	F + 900	30	FAILED	GOOD

## **Ti/Fe EXPLOSIVE METALCLADDING**

### **Bend test results**

a division of NOBEL EXPLOSIFS FRANCE, subsidiary of **SNPE** MATERIALS

## **IL TITANIO NEI MATERIALI INNOVATIVI FUNZIONALI**

E. Olzi, D. Gelli - CNR-ITM - Via Bassini 15, Milano (Italy)

### **Premessa**

La Scienza dei Materiali è nata, fra l'altro, per mettere in condizioni i progettisti di operare senza essere strettamente vincolati ai materiali esistenti, ma di progettare al meglio, avendo demandato agli ingegneri dei materiali appunto il compito di elaborare i materiali idonei al raggiungimento delle più convenienti caratteristiche dei manufatti finali.

Vediamo, tanto per chiarire il concetto, di portare un esempio di come dovrebbe instaurarsi il dialogo fra progettista e fornitore nel caso, abbastanza banale, di un progettista che debba servirsi di un tubo metallico in grado di sopportare una certa pressione al suo interno.

L'esempio si riferisce quindi a materiali strutturali.

Il progettista che opera in maniera tradizionale va a leggere su certe tabelle i valori delle caratteristiche meccaniche (solitamente statiche) e, applicando un convenzionale coefficiente di sicurezza, dimensiona il particolare in base a tali valori. Se però esamina un poco più a fondo il problema, considera che i dati delle tabelle si riferiscono in genere alla direzione longitudinale mentre le principali sollecitazioni sono radiali e tangenziali (il materiale, come si dice, "è più sollecitato sul trasverso"). E,

magari si tratta di tubo estruso o trafilato, la cui microstruttura é fibrosa, con andamento delle fibre strutturali ovviamente assiale e quindi con resistenza meccanica radiale e tangenziale, sensibilmente ridotta rispetto a quella longitudinale.

A questo punto si pongono al progettista due alternative.

La prima è di allargare le braccia e incrementare ulteriormente il coefficiente di sicurezza (incrementando quindi i costi: immediati e, ciò che spesso è peggio, quelli proiettati).

La seconda è di rivolgersi al proprio fornitore chiedendogli, p. es., se non sia possibile avere dei tubi con la fibrosità ad andamento elicoidale anziché assiale. Se la risposta é negativa e il "problema peso" é critico, il nostro progettista può insistere, chiedendogli se non sia possibile pensare ad un rinforzo della matrice metallica mediante dispersoidi o fibre eterogenee opportunamente in essa disposte. Se poi le condizioni di lavoro lo consentono, non gli nasconde che la sua mente già si sta rivolgendo al possibile impiego di materie plastiche rinforzate.

Starà allora al fornitore di tubi metallici vedere, con il suo ingegnere dei materiali, se sussistono le condizioni tecniche e di mercato che gli consentano di raccogliere la sfida.

Questo per dire come il produttore del materiale possa venire coinvolto nel processo progettuale.

Va subito specificato che la progettazione di strutture è solo un aspetto del problema, ossia quello relativo ai materiali strutturali. L'altro aspetto, che sta via via assumendo una rilevanza sempre maggiore, è quello relativo ai materiali così detti "funzionali", ossia applicati in funzione di loro particolari proprietà chimico fisiche per problemi ben definiti.

Storicamente, i primi materiali innovativi sviluppati sono stati quelli strutturali, quali ad esempio il cemento armato, il poliestere rinforzato con fibre di vetro, o nel campo dei materiali metallici, le superleghe di nichel sinterizzate e rinforzate per dispersione nonché altri materiali, fra cui meritano particolare interesse le leghe di titanio.

I materiali innovativi funzionali sono stati sviluppati ed applicati in periodi più recenti; fra essi sono da annoverarsi, ad es., i semiconduttori, i materiali getter ed altri meno noti, fra i quali i superconduttori, i materiali a memoria di forma e molti altri.

Ci limiteremo qui a riportare alcuni esempi relativi a materiali innovativi funzionanti contenenti titanio, in quanto i materiali strutturali della famiglia vengono già trattati in altri lavori in questo Convegno. Gli esempi scelti non esauriscono certo l'elenco delle applicazioni del titanio nei materiali funzionali, ma rappresentano alcuni casi forse meno noti che può essere utile aver presenti.

### **Materiali a memoria di forma**

La famiglia più importante di tali materiali è costituita da alcune leghe NiTi a determinate composizioni.

Questi materiali possiedono due caratteristiche che li rendono unici per il loro comportamento e le loro possibilità di applicazione: il recupero di una forma precedentemente "impressa in memoria", che avviene ad una certa temperatura, ed un comportamento pseudoelastico, che viene impropriamente definito superelasticità. Per spiegare con sufficiente chiarezza cosa ciò significa, tralasciando di parlare delle trasformazioni martensitiche alla base del processo, sarà opportuno fare un esempio: sarebbe possibile ottenere un filo metallico che, ad es., a 20°C ha forma rettilinea; innalzando la temperatura, ad es. a 40°C, questo filo assume spontaneamente la forma di una molta elicoidale; a tale temperatura la molla che si ottiene può essere tirata ed allungata con eccezionali caratteristiche di apparente deformabilità elastica, ma caratterizzata però da uno sforzo costante rispetto alla deformazione. Un siffatto materiale ha possibilità di impiego praticamente illimitate; l'unico limite è costituito dalla fantasia del progettista. Esistono attualmente due famiglie di tali materiali: una è costituita da leghe base rame (CuZnAl) ed una, già citata, a base di leghe NiTi senza o con aggiunte di altri elementi. Esistono già alcune applicazioni pratiche, soprattutto nel campo biomedicale, (come ad esempio le arcate per ortodonzia) ed un numero enorme di applicazioni possibili.

### **Materiali superconduttori**

L'impiego del titanio in tali materiali è limitato alle leghe NbTi, che

rappresentano però, a tutt'oggi, in pratica l'unico materiale superconduttore impiegato per l'avvolgimento di magneti superconduttori.

In questo caso le proprietà caratteristiche di questi materiali sono tre: l'assenza di resistenza elettrica, l'effetto Meissner e l'effetto Josephson.

Vediamo di spiegare con alcuni esempi la ricaduta tecnologica possibile di queste tre caratteristiche.

L'assenza di resistenza elettrica potrebbe permettere intanto la possibilità di realizzare elettrodotti di lunghezza illimitata senza pagare il prezzo energetico della dissipazione termica; inoltre potrebbe permettere la realizzazione di elettromagneti capaci di generare campi magnetici elevatissimi praticamente gratuiti (una volta a regime), semplicemente cortocircuitando gli estremi dell'elettromagnete; in tal caso, la corrente elettrica, non essendovi la resistenza elettrica, potrebbe circolare per tempo illimitato nel circuito senza dissipazione. Le applicazioni attuali sono principalmente nelle grandi macchine acceleratrici per lo studio della fisica delle particelle e, in campo ospedaliero, nella creazione di un campo magnetico continuo ed a geometria ben definita per la risonanza magnetica nucleare "imaging" per scopo diagnostico.

L'effetto Meissner consiste invece nel fatto che, nello stato di superconduttività, i materiali superconduttori divengono dei diamagnetici perfetti, ossia, non si lasciano attraversare, almeno fino ad un certo valore del campo, dal flusso magnetico; si propone il loro impiego, ad es., nella realizzazione di schermi elettromagnetici e nel campo della levitazione magnetica.

L'effetto Josephson consiste invece nel fatto che coppie di elettroni possono passare da un superconduttore ad un altro attraverso un isolante per effetto tunnel; il fenomeno viene però fortemente influenzato dalla presenza di campi magnetici anche debolissimi. Tale proprietà permette di realizzare dispositivi elettronici molto sofisticati che possono trovare applicazioni nel campo dei sensori magnetici, nei rivelatori ad infrarosso ed in moltissimi altri casi.

Fra i materiali superconduttori di uso pratico, oltre alla citata lega NbTi, sono da annoverarsi alcuni intermetallici fra cui il più noto è Nb<sub>3</sub>Sn, e, recentemente alcuni materiali ceramici della famiglia delle perovskiti.

Il lato negativo nell'applicazione pratica dei superconduttori è la

bassissima temperatura di esercizio (4.2K, temperatura di ebollizione dell'elio liquido), inconveniente che però è stato recentemente molto ridimensionato dalla recente scoperta dei superconduttori ceramici, che hanno permesso di avere il fenomeno della superconduttività a temperature notevolmente superiori al punto di ebollizione dell'azoto liquido (77K), anche se molta strada deve ancora essere fatta per rendere possibili delle applicazioni pratiche, almeno su larga scala.

### **Materiali getter**

E' nota a tutti la reattività del titanio nei confronti dei gas in generale e dell'ossigeno in particolare. Ciò permette di considerare il titanio ed alcune sue leghe quali materiali utilizzabili nella produzione e nella correzione del vuoto, ossia dei materiali "getter".

Tali materiali mostrano la proprietà di assorbire enormi quantità di gas, ben superiori allo stesso volume degli stessi gas liquefatti, in determinate condizioni di temperatura e pressione. Rappresentanti della famiglia sono, oltre al titanio ed ad alcune sue leghe, tutta una serie di composti intermetallici. Senza volerci dilungare sulle notevolissime applicazioni pratiche attuali o future, quali ad esempio la possibilità di ottenere un buon vuoto senza la necessità di utilizzare componenti meccanici, basterà ricordare esperimenti in corso volti a studiare la possibilità di intrappolare enormi quantità di idrogeno in opportuni "serbatoi" in grado di stoccare tale gas in grande quantità ed in condizioni di assoluta sicurezza, quali quelle richieste, ad es., nel caso di carburanti nel settore dell'autotrazione. Studi in tal senso sono in corso.

### **Materiali per l'elettrometallurgia**

In tale settore sono riportati molti esempi. Mi limiterò ad un solo caso relativo alla produzione di zinco elettrolitico.

La deposizione elettrolitica dello zinco viene effettuata da soluzioni solforiche e depurate ottenute dalla lisciviazione della blenda calcinata. Gli elettrodi impiegati sono l'alluminio al catodo ed il piombo all'anodo. Tale sistema però comporta un inquinamento da parte dello zinco prodotto a

causa della sovratensione sugli anodi. E' stato pertanto studiato e realizzato in impianti pilota l'impiego degli anodi in titanio che, dato il loro carattere chimico, non presentano tale inconveniente.

## **Leghe madri**

Leghe madri di Al-Ti ed Al-Ti-B in pani od in filo vengono correntemente impiegate per l'affinazione del grano nei formati di alluminio e sue leghe. Tale affinazione si rende necessaria per conferire al materiale prodotto migliori caratteristiche meccaniche e di lavorabilità.

## **Composti di titanio**

Titanati.

I titanati di metalli alcalino terrosi formano una famiglia di composti dotati di interessanti proprietà funzionali. La costante dielettrica, ad es., passa dal valore di 13 per  $MgTiO_3$  a valori dell'ordine delle decine di migliaia per soluzioni solide di  $SrTiO_3$  in  $BaTiO_3$ . Lo stesso titanato di bario ha una costante dielettrica di circa 10.000 anche in prossimità del punto di Curie ( $120^\circ C$ ).

Le proprietà dielettriche, inoltre, sono associate con uno stato polarizzato stabile, analogo allo stato polarizzato che, in campo magnetico, si ha nei magneti permanenti; è questa la ragione per cui i materiali in questione vengono anche definiti "materiali ferroelettrici".

Oltre alle proprietà dette sopra, il titanato di bario presenta proprietà piezoelettriche e pertanto viene oggi largamente impiegato come trasduttore, sia nella generazione che nella rivelazione delle vibrazioni meccaniche (e quindi acustiche). Esso presenta, rispetto al sale di Rochelle, una migliore stabilità termica e, rispetto al quarzo, una migliore resistenza meccanica ed una migliore attitudine ad assumere forme varie, anche complicate.

## **Esteri di titanio**

Prodotti nella reazione di  $TiCl_4$  con alcoli, come ad es.  $Ti(OC_nH_{2n+1})_4$ ,

sono usati come agenti impermeabilizzanti per una varietà di tessuti naturali e sintetici. Il Tetrabutile ed il Tetraisopropile idrolizzano in aria umida dando origine ad un rivestimento sottile, aderente e trasparente di ossido di titanio  $TiO_2$ .

Il Diacetato  $TiCl_2(O_2C_2H_3)_2$  è stato suggerito come ritardante alla fiamma per i tessuti a base di cellulosa.

L'Acetilacetato  $Ti(C_6H_8O_2)_2$  è invece stato suggerito come agente di cross-linking nelle lacche.

Aluri-alchili complessi contenenti titanio, del tipo  $(C_2H_5)_2TiCl_2Al(C_2H_5)_2$ , costituiscono una famiglia di catalizzatori importanti nella produzione a bassa pressione di polimeri, specie ad elevato peso molecolare o di caratteristiche particolari.

## **Conclusioni**

Abbiamo qui riferito, in maniera molto sommaria, di alcune applicazioni di questo prezioso metallo. Sarebbe forse da aggiungere, oltre all'aggettivo "prezioso", anche quello di "costoso"; ma anche qui bisogna fare una importante distinzione: il costo elevato non è riferito alla sua rarità in natura (sulla crosta terrestre è più diffuso dell'alluminio), ma alla sua estrema suddivisione in composti ed alla sua metallurgia molto costosa e complicata. E' auspicabile che altre idee, quale la via elettrolitica in sostituzione del processo Kroll, già qui applicata, possano vedere la luce e portare il prezzo del titanio a valori commercialmente interessanti per le applicazioni di massa.

## Electroslag Remelting of Titanium

by

A. Choudhury, H. Scholz and N. Ludwig

all with LEYBOLD DURFERRIT GmbH, Erlensee/Germany

### Introduction

The titanium metal as an engineering material came into use in the 1950's in the USA in response to the critical demands for low density, high strength material for aircrafts and emerging space technologies. The titanium-industry was mostly interested in the aircraft, specially military aircraft, and space market, where the cost was not a primary criterion for the selection of the material. But times have changed now. The consumption of titanium in the aircraft- and space industry is stagnant for the last five years. The titanium-industry must look for markets other than the aerospace industry.

### Non-Aerospace Application of Titanium

Titanium has an excellent resistance to corrosion in most environments. Accordingly there is a number of materials being used today in such applications can be totally or partly replaced by titanium. In a recent study carried out by Charles River Associates /1/ in 1991 shows a variety of materials where titanium has a relative advantage (Fig. 1):

- Cupronickel (90/10 and 70/30)
- 316 stainless steel
- Super-ferritic stainless steel
- Super-austenitic stainless steel
- Duplex stainless steel
- Hastalloy C-276

Fig. 2 shows the portion of the market of competitive materials which can be potentially substituted by titanium. It is evident, that titanium can gain a sizable market just by replacing the stainless steel grades in non-aerospace applications. Fig. 3 shows that titanium may compete with high performance stainless steel by reducing sponge prices and by reducing the thickness or by a combination of both. In case of standard stainless steel grade (316) a substantial reduction of thickness is required. In this figure only the cost for titanium sponge has been considered. But another important factor for titanium price is also the melting and fabrication of the final product.

For an effective competition with the stainless steel grade 316 it will be necessary to reduce the cost of the complete route of fabrication (Fig. 4). The figure demonstrates the titanium competition with super-austenitic stainless steel as well as with 316 stainless steel grade. It is evident that a 30 % reduction of cost for melting and further fabrication (value added for melting and primary fabrication) with simultaneous reduction of sponge price the cost effectiveness of titanium comes very close to the grade 316 stainless. The question is, how to save cost in melting and further fabrication? The present production route for titanium rolled products is as follows (Fig. 5):

- consumable vacuum arc remelting at least twice
- forging to slab or square
- surface conditioning
- rolling

As with vacuum arc remelting process only round ingots can be produced, a forging sequence with subsequent surface conditioning must be introduced into the production route in order to get rollable material. Appreciable cost saving is therefore only possible by direct remelting to slabs or squares with subsequent rolling without any forging. It appears, that this can be realized with electroslag remelting (ESR) of titanium.

### Electroslag Remelting of Titanium

Consolidation of titanium sponge by ESR-process was started early in the 1960's, specially in the USSR /2/ and also in the USA /3/. It is reported, that USSR is melting titanium with ESR-process in a production scale. But in the western world this technology did not experience a technological break-through till now. LEYBOLD DURFERRIT GmbH has therefore carried out experimental works in order to determine the suitable metallurgical parameters to get optimum results in respect of ingot quality.

Titanium is a reactive metal with high affinity for oxygen and nitrogen. Apart from that, titanium reacts with almost all oxides at high temperature. Bearing this in mind, the electroslag remelting of titanium must fulfill the following parameters:

- furnace atmosphere must be free from oxygen and nitrogen, eg. an inertgas atmosphere must be secured
- slag must be free from oxides, which can be reduced by titanium

In order to assure a 100 % inertgas furnace atmosphere the usual ESR-furnace with a hood is not suitable. The ESR-unit must be a closed chamber installation. The conception of such an ESR-plant is not new. LEYBOLD DURFERRIT GmbH has already built such furnaces for electroslag remelting under pressure (PESR). Fig. 6 shows schematically a PESR-furnace, which can work also under vacuum or inertgas atmosphere. The present experimental work was carried out with such a laboratory scale PESR-furnace equipped with a pumping set for prior evacuation of the furnace chamber.

The common ESR-slugs are based on  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}$ , sometime with some additions of  $\text{MgO}$  and/or  $\text{SiO}_2$ . depending on the alloy grade to be remelted. For titanium remelting slags containing  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{SiO}_2$  can not be used, as they are sources of undesired contaminations in titanium. According to the published literature the most suitable slag for titanium remelting is pure calcium-fluoride. The present work was carried out therefore with technically pure  $\text{CaF}_2$ .

Tab. 1 shows the remelting parameters of the three experiments. Before starting the remelting process the furnace chamber was evacuated to a pressure of approx.  $2 \times 10^{-2}$  mbar and subsequently filled with argon of a purity of 99,99 % to a pressure of approx. 1000 mbar. The first melt was carried out with pure  $\text{CaF}_2$ , whereas in two other melts some additions were made in the  $\text{CaF}_2$ -slag. It is evident from Tab. 1, that the melt rate of the first melt is much lower inspite of higher power consumption. Fig. 7 shows the titanium-ingot and the primary structure of the ingot. The macrostructure is dense and free from any oxides.

The chemical composition of the ingot, in respect of gas- and carbon-content, is listed in Tab. 2. It can be seen from Tab. 2, that there is an overall-decrease in the concentration of carbon and hydrogen in the remelted ingot. In case of nitrogen, the remelted materials show a little higher concentration than in the electrode. There is no additional oxygen-pick up during remelting. It must of course be mentioned, that the content of oxygen and nitrogen in the electrodes are probably not representative for whole electrode. It is evident, that all values are within the ASTM-specification for grade 1 titanium.

## Conclusion

- Electroslag remelting is an efficient process for consolidation of titanium.
- It appears, that a single melting will be sufficient for further working.
- With proper process control any additional pick up of undesired elements, eg. oxygen and nitrogen, can be completely avoided.

## Literature

- /1/ Firoze E. Katratz, I.S. Servi and I.C. Agarwal  
"Non-Aerospace Applications, Titanium Sole Opportunity for Growth"  
Metal Bulletin Monthly, August 1991, pp. 28 to 33
- /2/ S.M. Gurewich and Co-workers  
"Properties of Technical Grade Titanium and OT4-Alloys Produced by Electroslag Melting"  
Automatic Welding (1963), Vol. 16, pp. 20 to 21
- /3/ C.E. Armentront and R.H. Nafziger  
"Development Electroslag Melting of Titanium"  
Trans American Foundrymen's Society 77 (1969), pp. 353 to 359

## Competing Material with Titanium

- \* Cupronickels (90/10 and 70/30)
- \* Super-Ferritic Stainless
- \* Super-Austenitic Stainless
- \* Duplex Stainless
- \* AISI 316 Stainless
- \* Hastalloy C-276

Fig. 1: Competing Material with Titanium

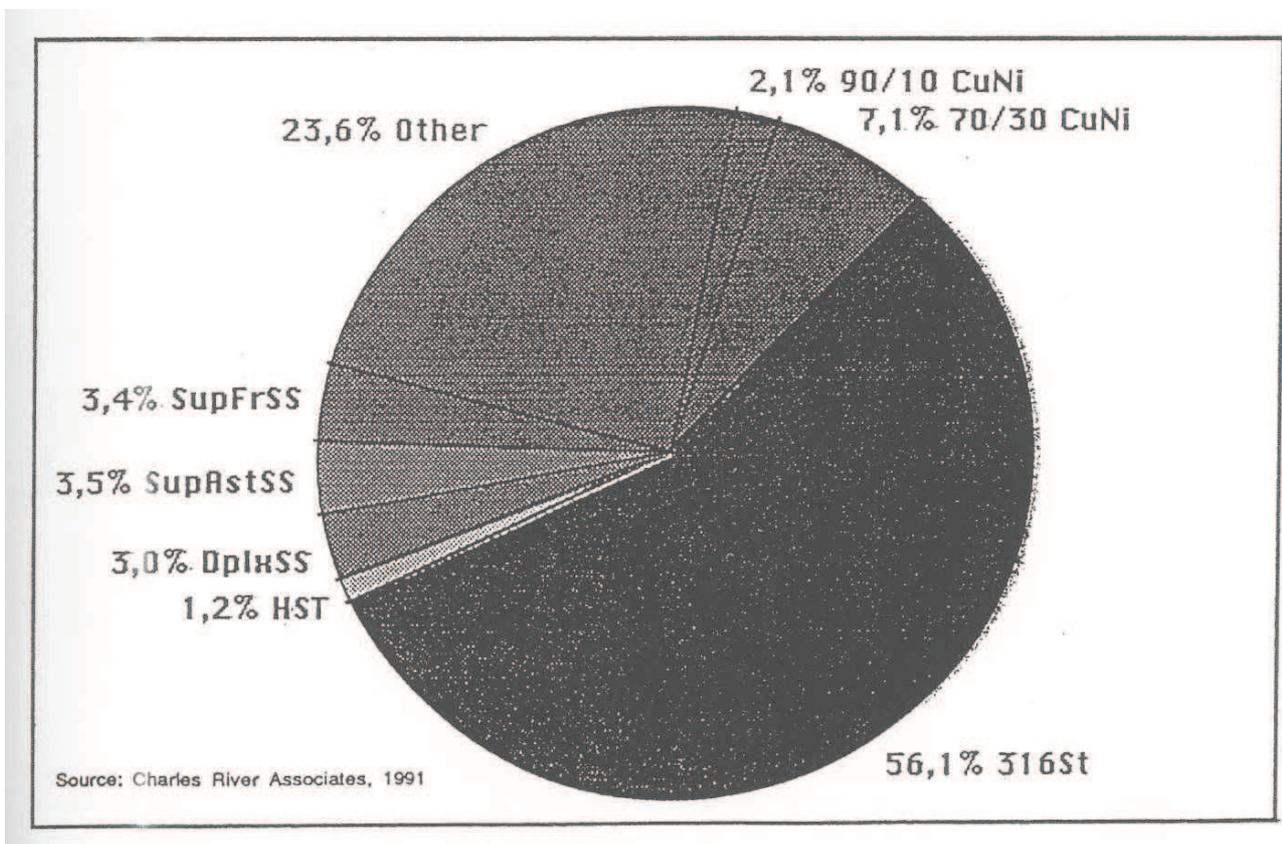


Fig. 2: Weight of Materials in Uses Potentially Available to Titanium

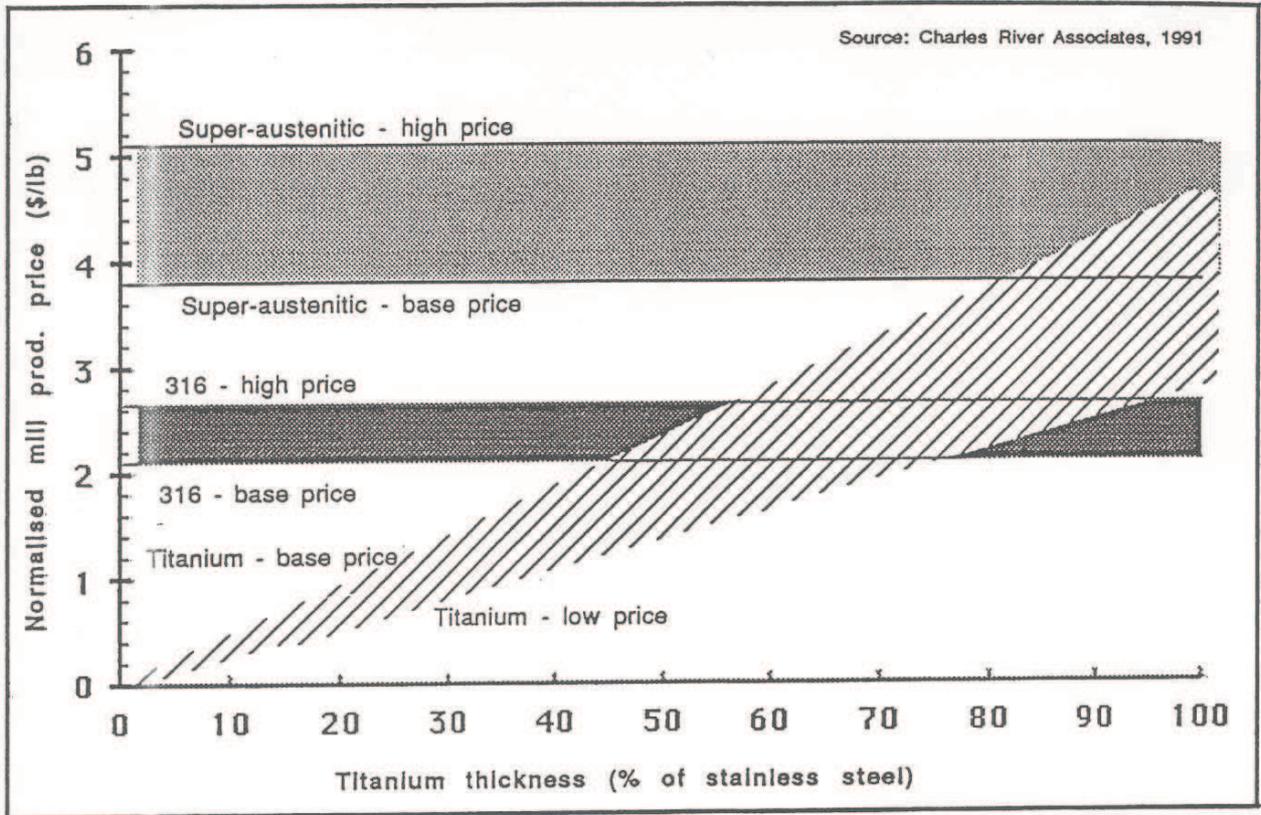


Fig. 3: Cost Effectiveness of Titanium Compared with Stainless Steels as a Function of Thickness

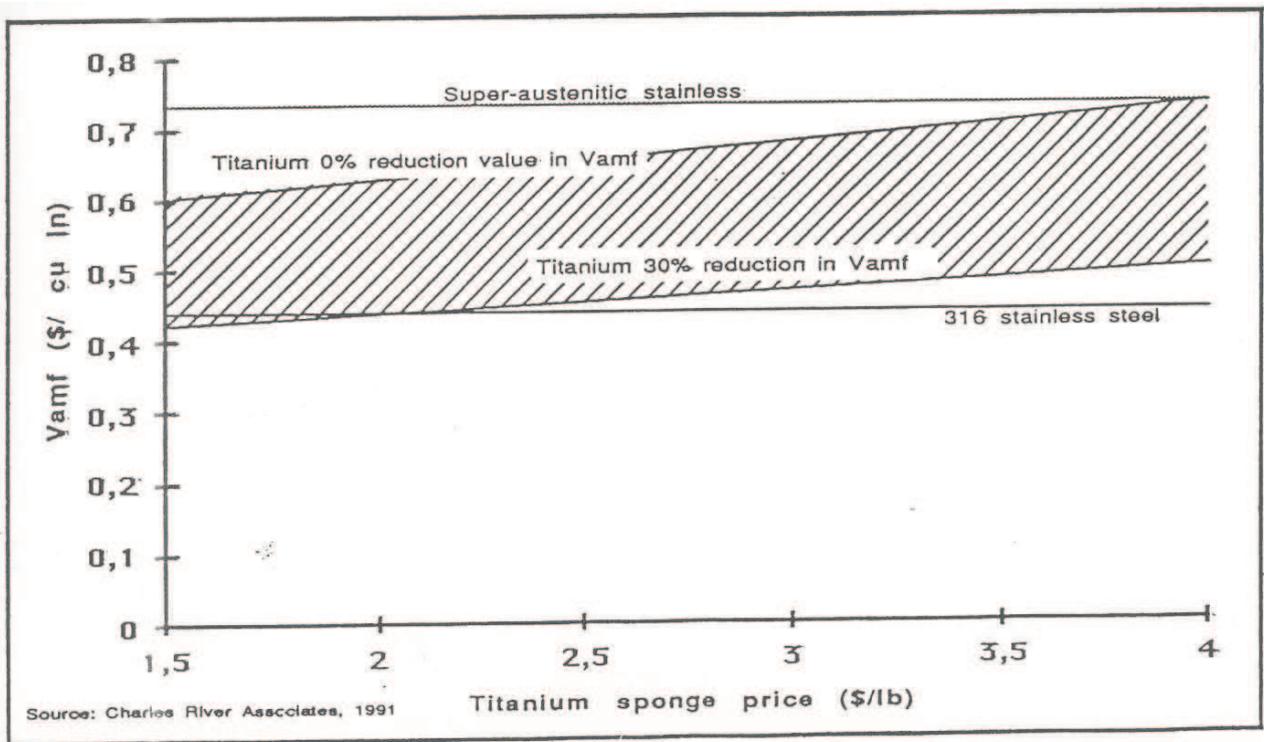
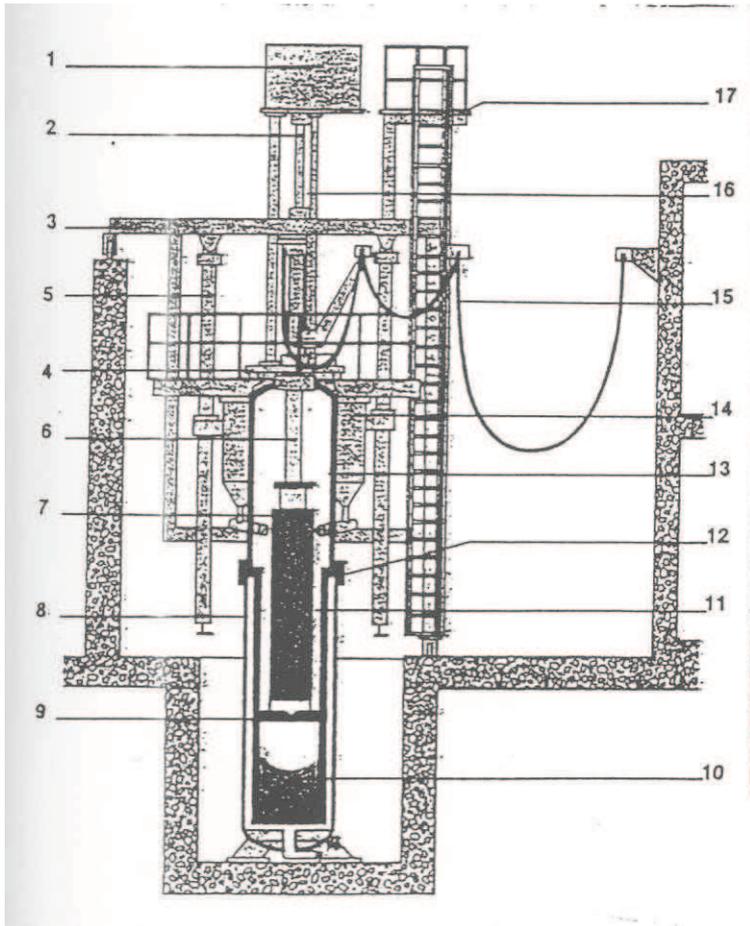


Fig. 4: combinations of Sponge Cost and Reduction in Mill Product Vamf which make Titanium Cost Effective with Super-Austenitic and 316 Stainless

### Production Route for Titanium

- \* Consumable Vacuum Arc Remelting at least Twice
- \* Forging to Slab or Square
- \* Surface Conditioning
- \* Rolling to Desired Dimensions

Fig. 5: Production Route for Titanium



- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 | Electrode Feed Drive System   |
| 2 | Ball Screw                    |
| 3 | Movable Furnace Support Frame |
| 4 | Load Cell System              |
| 5 | Furnace Lifting System        |
| 6 | Electrode Ram                 |
| 7 | Electrode                     |
| 8 | Water Jacket                  |
| 9 | Slag Pool                     |
- 
- |    |                         |
|----|-------------------------|
| 10 | Ingot                   |
| 11 | Mold Assembly           |
| 12 | Quick Flange Clamp      |
| 13 | Vacuum/Pressure Chamber |
| 14 | Alloy Feeder            |
| 15 | Coaxial Power Cables    |
| 16 | Ram Guiding System      |
| 17 | Maintenance Platform    |

Fig. 6: Pressure/VAC-ESR Installation

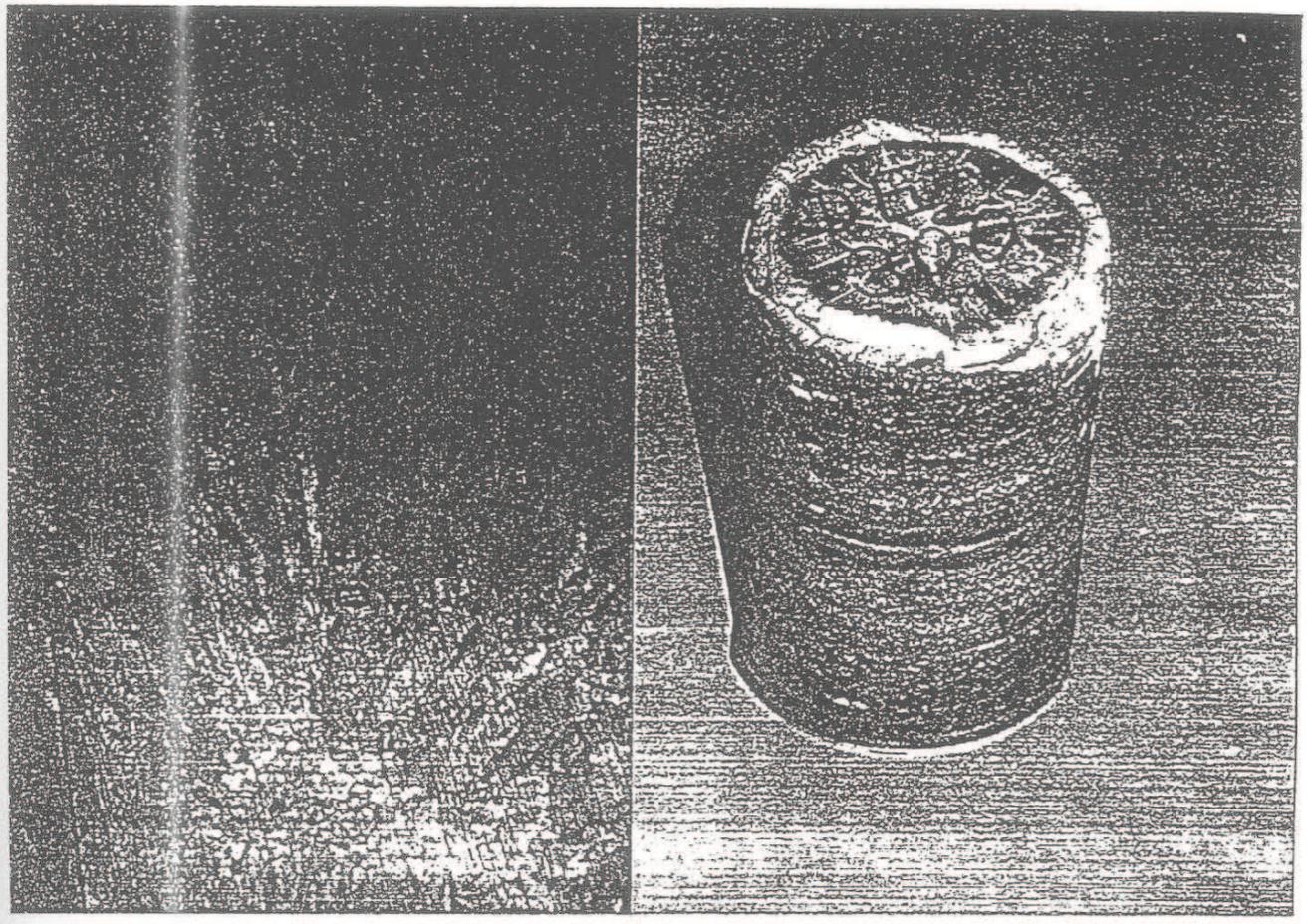


Fig. 7: Titanium Ingot and Primary Structure of the Ingot

Tab. 1: Remelting Parameters

	Melt No. 1	Melt No. 2	Melt No. 3
Electrode diameter	110	110	110
Electrode length	850	1000	1000
Electrode weight	25,8	29,8	29,8
Mold diameter	170	170	170
Current	4	3,8	3,8
Power	135	100	100
Melt rate	19,0	52,6	54,2

Tab. 2: Carbon- and Gas-content of the Titanium Ingot

Element	Ingot No. 1				Ingot No. 2				Ingot No. 3				ASTM-Specifica- tion for Titanium Grade 1
	Electrode	B	M	T	Electrode	B	M	T	Electrode	B	M	T	
C (ppm)	80 - 150	50	60	60	60-100	100	60	60	80-90				max. 1000
O (ppm)	600-900	700	650	600	700-1300	1300	1050	800	500-1300				max. 1800
N (ppm)	100-150	180	170	170	80-160	180	170	140	70-160				max. 300
H (ppm)	76-94	25	24	24	34-42	35	30	26	36-41				max. 150
F (ppm)	-	60	60	60	-	60	60	60	-				

SEVENTH INTERNATIONAL MEETING ON TITANIUM  
Turin, Italy  
November 15, 1991

OPTIMAL PRODUCTION AND TRADE IN  
INTERNATIONAL TITANIUM MARKETS

by

Janet Koscianski, Ph.D.  
Associate Professor of Economics  
Shippensburg University

INTRODUCTION  
AND  
RATIONALE

The transformation of metallic minerals into metal products entails a variety of processing stages. Moreover, successive stages in the processing chain are often interdependent in the sense that the output of one stage becomes the input to the following one. In a typical metal production process, natural resources are first extracted from the earth and then beneficiated using washing and separation techniques. Afterward, the concentrated ores are smelted and transformed into unwrought metallic forms such as ingots. Later the ingots are melted and used to produce finished metal products.

Despite the input-output relationships linking successive stages in the minerals-to-metals processing chain, sequential stages of production usually need not take place in the same location. Frequently, later processing stages are located in countries with little or none of the natural resources necessary for production of the intermediate or finished metal forms.

Such is the case in the multistage titanium metal industry. Due to its high reactivity with other elements, particularly oxygen, titanium does not exist in nature in its metallic state. Rather, the production of titanium metal typically follows a series of three distinct processing stages. First, ore containing a high concentration of titanium dioxide, such as rutile, is

extracted from the earth and beneficiated. In the second stage, the ore is combined with either magnesium or sodium in an electrochemical reduction process. This results in the production of a highly porous, irregularly-shaped metal known as titanium sponge. In the final stage, the titanium sponge is either melted into cast metal products or compacted into ingots for later use in the manufacture of titanium mill products. The conversion of titanium ore to its metallic state requires complex, energy-intensive production technology. The energy necessary to produce one ton of titanium is sixteen times that required for the production of one ton of steel and nearly twice that needed for one ton of aluminum.

The various stages of titanium mineral and metal production are widely dispersed throughout the world. In 1986, Australia, Sierra Leone, and the Republic of South Africa collectively mined over 93 percent of the rutile produced worldwide.<sup>1</sup> However, virtually all of this natural resource was exported to other countries for further processing. During the same period, the three largest producers of titanium sponge and metal, the Soviet Union, the United States, and Japan, possessed little or no high-grade titanium ore.

In its metallic form titanium is light in weight and extremely strong. Throughout its forty-year commercial history, the primary use of titanium metal has been in the manufacture of civilian and military aircraft. However, due to the cyclic nature of the civilian aerospace industry and the unpredictability of military orders for aircraft, future demand for titanium metal has often been difficult to accurately forecast. This has, in turn, led to periods of over capacity and low profitability in the titanium metal industry. Many producers of titanium metal, particularly in the United States, have been reluctant to modernize or expand their production facilities because of the uncertainty of future market conditions.

Due to the importance of titanium metal to the civilian and military aerospace industries, both the ore and metal forms of titanium are classified as strategic materials by the Office of Technology Assessment of

---

<sup>1</sup> U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodity Summaries*, (Washington, D.C.: Government Printing Office, 1988), 133.

the U.S. Congress, and are stockpiled by government and industry. The strategic nature of titanium minerals and metal coupled with the geographic dispersion of their production and consumption clearly make this an important industry for economic analysis. Yet despite the strategic significance of this metal, the titanium mineral and metal industries have rarely been the focus of any substantive economic research.

The primary objective of this study, is to determine the optimal production location and trade patterns for the three stages of titanium metal manufacture. By incorporating country-specific data on technology, capacity, production costs, transport costs, tariffs, exchange rates, and demand, into a mixed integer linear programming model, the cost minimizing production levels and trade flows for titanium ore, sponge, and metal are determined.

Economic theory contends that the location of an industry and its concomitant trading patterns are heavily influenced by cost considerations, or in the vernacular of international trade theorists, comparative advantage. Furthermore, industry specialists assert that the future prosperity of the titanium metal industry will largely be determined by its ability to reduce costs and successfully compete with other materials. This is especially true for aerospace applications of titanium metal. Serious substitution threats by composite materials in structural components and advanced ceramics in jet engines must be faced by the titanium metal industry in the near future.<sup>2</sup> Therefore, the determination of the production sites and trade patterns which would minimize costs in the titanium market will serve as an indicator of possible manufacturing strategies which will improve the industry's competitive position.

---

<sup>2</sup> Ronald F. Balazik and Barry W. Klein, *The Impact of Advanced materials on Conventional Nonfuel Mineral Markets: Selected Forecasts for 1990-2000*, (Washington, D.C.: Government Printing Office, 1987), 6-7

TESTED HYPOTHESIS  
AND  
THE MIXED INTEGER PROGRAMMING MODEL

The objective of this study is to determine the cost minimizing location of production and patterns of world trade for titanium ore, sponge, and metal which will satisfy a given worldwide level of titanium metal demand. More specifically, the hypothesis that the actual location and level of production at each stage of titanium metal manufacture was no different than the optimal pattern of production is tested. If this hypothesis is accepted it will indicate that the production of titanium minerals and metals has tended to take place in those countries where the combined cost of production and transport was lowest given the geographic distribution and level of titanium metal demand. If this hypothesis is rejected, this would indicate that factors other than production and transport costs have influenced the location of titanium ore and metal production.

To test this hypothesis, the optimal levels of production are compared with the actual quantities of titanium ore, sponge, and metal produced in each country. The Wilcoxon test is then used to determine if the deviation between the two distributions is purely random. If the differences between the actual and optimal spatial distribution of titanium production differ nonrandomly this would indicate that nonprice factors have significantly influenced worldwide production location and, subsequently, trade in this industry.

To accurately model production and international trade in the multistage titanium industry, a mixed integer linear program is developed for this study. Mixed integer programming refers to a class of programming problems wherein some of the decision variables are restricted to integers. In the present model, binary (0-1) integer variables are used to determine the optimal location of titanium ore, sponge, and metal production from a given set of sites. They also enable one to incorporate fixed production costs into the model.

The objective of the mixed integer program formulated for this study is to determine the level of output at each of the possible titanium ore,

sponge, and ingot production sites, along with the pattern of international trade which will minimize the sum of production and transportation costs for a given worldwide spatial distribution of titanium metal demand. The three stages of titanium metal manufacture, ore extraction, sponge production, and metal production, are made interdependent in the model using constraints which link demand for titanium ore and sponge with the materials requirements for a specified quantity of titanium metal.

From a theoretical perspective, this study may be viewed as a fundamental problem of economic choice. Essentially, there exist sets of feasible locations for three economic activities, titanium ore extraction, sponge production, and ingot manufacture, from which an economic choice is made. In order to determine the optimal production distribution for the titanium industry, it is necessary to know the quantity of titanium metal demanded at all consumption points, production costs at all possible production sites, and transportation costs between all feasible production sites and consumption locations. Demand for the final product, in the present case titanium ingot, is taken as exogenous.

Empirically, the problem is essentially a variant of the standard linear programming transportation problem. However, rather than minimizing only transport costs, the objective is to minimize production costs, both fixed and variable, as well as transport costs. The solution to such a model will yield the optimum patterns of production and trade in the multistage titanium industry capable of meeting demand at minimum cost, given existing capacities and costs which vary across producing locations.

The model is short-run in nature, as evidenced by the inclusion of fixed production costs in the objective function, with markets and feasible supply sources specified *a priori*. As a result, the potential for bottlenecks in the system exists with respect to production capacities and the quantities of commodities which may be shipped to each market. The mixed integer program developed for this study is capable of assessing such problems.

### MIXED INTEGER PROGRAM<sup>3</sup>

Let  $i$  = producing country  
 $j$  = consuming country  
 $o$  = set of countries with ore reserves  
 $s$  = set of countries with sponge production capacity  
 $m$  = set of countries with metal production capacity  
 $o'$  = set of ore consuming countries  
 $s'$  = set of sponge consuming countries  
 $m'$  = set of metal consuming countries  
 $x_{ij}^o$  = quantity of ore shipped from country  $i$  to country  $j$   
 $x_{ij}^s$  = quantity of sponge shipped from country  $i$  to country  $j$   
 $x_{ij}^m$  = quantity of metal shipped from country  $i$  to country  $j$   
 $y_i^o$  = 0-1 decision variable for ore production in country  $i$ , where  $y_i^o$  will equal one if ore production takes place in country  $i$ , otherwise  $y_i^o$  will equal zero.  
 $y_i^s$  = 0-1 decision variable for sponge production in country  $i$ , where  $y_i^s$  will equal one if sponge production takes place in country  $i$ , otherwise  $y_i^s$  will equal zero.  
 $y_i^m$  = 0-1 decision variable for metal production in country  $i$ , where  $y_i^m$  will equal one if sponge production takes place in country  $i$ , otherwise  $y_i^m$  will equal zero.

The objective of the mixed integer program is to determine the optimal values of the decision variables,  $x_{ij}^o$ ,  $x_{ij}^s$ ,  $x_{ij}^m$ ,  $y_i^o$ ,  $y_i^s$ ,  $y_i^m$ , which minimize  $K$ , total production and transportation costs for the multistage titanium industry as follows:

---

<sup>3</sup> The assumptions employed in this model are outlined in Appendix A.

$$\begin{aligned}
k = & \sum_{i \in \mathcal{O}} \sum_{j \in \mathcal{O}'} c_i^{\mathcal{O}} x_{ij}^{\mathcal{O}} + \sum_{i \in \mathcal{O}} f_i^{\mathcal{O}} y_i^{\mathcal{O}} + \sum_{i \in \mathcal{O}} \sum_{j \in \mathcal{O}'} t_{ij}^{\mathcal{O}} x_{ij}^{\mathcal{O}} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{O}} \sum_{j \in \mathcal{O}'} r_{ij}^{\mathcal{O}} x_{ij}^{\mathcal{O}} + \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}'} c_i^{\mathcal{S}} x_{ij}^{\mathcal{S}} + \sum_{i \in \mathcal{S}} f_i^{\mathcal{S}} y_i^{\mathcal{S}} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}'} t_{ij}^{\mathcal{S}} x_{ij}^{\mathcal{S}} + \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}'} r_{ij}^{\mathcal{S}} x_{ij}^{\mathcal{S}} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{M}'} c_i^{\mathcal{M}} x_{ij}^{\mathcal{M}} + \sum_{i \in \mathcal{M}} f_i^{\mathcal{M}} y_i^{\mathcal{M}} + \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{M}'} t_{ij}^{\mathcal{M}} x_{ij}^{\mathcal{M}} \\
& + \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{M}'} r_{ij}^{\mathcal{M}} x_{ij}^{\mathcal{M}}
\end{aligned} \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{j \in \mathcal{O}'} x_{ij}^{\mathcal{O}} \leq U_i^{\mathcal{O}} y_i^{\mathcal{O}} \quad \text{for all } i \in \mathcal{O} \tag{2}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}'} x_{ij}^{\mathcal{S}} \leq U_i^{\mathcal{S}} y_i^{\mathcal{S}} \quad \text{for all } i \in \mathcal{S} \tag{3}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{M}'} x_{ij}^{\mathcal{M}} \leq U_i^{\mathcal{M}} y_i^{\mathcal{M}} \quad \text{for all } i \in \mathcal{M} \tag{4}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{O}} x_{ij}^{\mathcal{O}} \geq a^{\mathcal{O}, \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}'} x_{ij}^{\mathcal{S}} \quad \text{for all } i \in \mathcal{S} \\
\text{for all } j \in \mathcal{O}' \tag{5}$$

where  $s = \mathcal{O}'$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} x_{ij}^{\mathcal{S}} \geq a^{\mathcal{S}, \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{M}'} x_{ij}^{\mathcal{M}} \quad \text{for all } i \in \mathcal{M} \\
\text{for all } j \in \mathcal{S}' \tag{6}$$

where  $m = \mathcal{S}'$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} x_{ij}^{\mathcal{M}} \geq D_j^{\mathcal{M}} \quad \text{for all } j \in \mathcal{M}' \tag{7}$$

$$y_i^{\mathcal{O}} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^{\mathcal{O}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in \mathcal{O} \tag{8}$$

$$y_i^{\mathcal{S}} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^{\mathcal{S}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in \mathcal{S} \tag{9}$$

$$y_i^{\mathcal{M}} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^{\mathcal{M}} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in \mathcal{M} \tag{10}$$

$$x_{ij}^{\mathcal{O}} \geq 0 \quad \text{for all } i \in \mathcal{O} \\
\text{for all } j \in \mathcal{O}' \tag{11}$$

$$x_{ij}^{\mathcal{S}} \geq 0 \quad \text{for all } i \in \mathcal{S} \\
\text{for all } j \in \mathcal{S}' \tag{12}$$

$$x_{ij}^m \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in m \\ \text{for all } j \in m' \end{array} \quad (13)$$

A concise explanation of each of the elements in aforementioned mixed integer program is provided in the following sections. For the convenience of the reader, the objective function and each of the constraints in the model is repeated as it is discussed.

### 1. Objective Function

The objective of this study is to determine the level of output at each of the possible titanium production sites and the pattern of international trade which will minimize the sum of production and transport costs while fulfilling titanium demand worldwide. This is achieved by the determination of the values of the decision variables,  $x_{ij}^o$ ,  $x_{ij}^s$ ,  $x_{ij}^m$ , which represent, respectively, flows of titanium ore, sponge, and metal between supplying country  $i$  and demanding country  $j$ , and the 0-1 integer decision variables for ore, sponge, and metal production,  $y_i^o$ ,  $y_i^s$ ,  $y_i^m$ , which minimize the value of the objective function.

The objective function employed in this analysis measures variable production costs ( $c_j^o x_{ij}^o$ ,  $c_i^s x_{ij}^s$ ,  $c_i^m x_{ij}^m$ ), fixed production costs ( $f_i^o y_i^o$ ,  $f_i^s y_i^s$ ,  $f_i^m y_i^m$ ), transport costs ( $t_{ij}^o x_{ij}^o$ ,  $t_{ij}^s x_{ij}^s$ ,  $t_{ij}^m x_{ij}^m$ ), and tariffs ( $r_{ij}^o x_{ij}^o$ ,  $r_{ij}^s x_{ij}^s$ ,  $r_{ij}^m x_{ij}^m$ ), for each stage of titanium production and distribution. The superscripts,  $o$ ,  $s$ ,  $m$ , denote the stage of titanium production, either ore, sponge, or metal, respectively. These various costs are summed over the sets of countries with titanium ore reserves ( $i \in o$ ), titanium sponge production capacity ( $i \in s$ ), and titanium metal production capacity ( $i \in m$ ), as well as the sets of countries consuming titanium ore ( $j \in o'$ ), sponge ( $j \in s'$ ), and metal ( $j \in m'$ ). Mathematically, the objective of the mixed integer program is stated as follows:

$$\begin{aligned}
\text{Min } k = & \sum_{i \in o} \sum_{j \in o'} c_i^o x_{ij}^o + \sum_{i \in o} f_i^o y_i^o + \sum_{i \in o} \sum_{j \in o'} t_{ij}^o x_{ij}^o \\
& + \sum_{i \in o} \sum_{j \in o'} r_{ij}^o x_{ij}^o + \sum_{i \in s} \sum_{j \in s'} c_i^s x_{ij}^s + \sum_{i \in s} f_i^s y_i^s \\
& + \sum_{i \in s} \sum_{j \in s'} t_{ij}^s x_{ij}^s + \sum_{i \in s} \sum_{j \in s'} r_{ij}^s x_{ij}^s \\
& + \sum_{i \in m} \sum_{j \in m'} c_i^m x_{ij}^m + \sum_{i \in m} f_i^m y_i^m + \sum_{i \in m} \sum_{j \in m'} t_{ij}^m x_{ij}^m \\
& + \sum_{i \in m} \sum_{j \in m'} r_{ij}^m x_{ij}^m
\end{aligned}$$

## 2. Ore production Constraint

If country  $i$  which possesses titanium ore reserves, ( $i \in o$ ), is selected for ore production, then output must not exceed the country's ore reserves. Furthermore, ore production in country  $i$  will be zero if  $y_i^o$ , the 0-1 integer decision variable associated with ore production in that country, is zero.

$$\sum_{j \in o'} x_{ij}^o \leq U_i^o y_i^o \quad \text{for all } i \in o \quad (2)$$

## 3. Sponge Production Constraint

If country  $i$  which possesses titanium sponge production capacity, ( $i \in s$ ), is selected for sponge manufacture, then output must not exceed the country's sponge production capacity. In addition, sponge production in country  $i$  is zero if  $y_i^s$ , the 0-1 integer decision variable associated with sponge production in that country, is zero.

$$\sum_{j \in s'} x_{ij}^s \leq U_i^s y_i^s \quad \text{for all } i \in s \quad (3)$$

## 4. Metal production Constraint

If country  $i$  with titanium metal production capacity, ( $i \in m$ ), is selected for metal production, then output must not exceed the country's metal production capacity. Furthermore, metal production is zero in country  $i$  if  $y_i^m$ , the 0-1 integer decision variable representing titanium metal production in that country, is zero.

$$\sum_{j \in m'} x_{ij}^m \leq U_i^m y_i^m \quad \text{for all } i \in m \quad (4)$$

### 5. Ore Demand/Materials Balance Constraint

This constraint combines the materials balance relationship existing between the titanium ore and sponge production with titanium ore demand. The input-output coefficient,  $a^{o,s}$ , measures the quantity of ore needed to produce one unit of titanium sponge. If a country produces titanium sponge then shipments of ore to the country must be sufficient for its level of sponge production. Clearly, if a country is to produce sponge, then it must demand ore. Hence, the set of countries producing sponge,  $s$ , must be equal to the set of countries demanding ore,  $o'$ .

$$\sum_{i \in o} x_{ij}^o \geq a^{o,s} \sum_{j \in s'} x_{ij}^s \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in s \\ \text{for all } j \in o' \\ \text{where } s = o' \end{array} \quad (5)$$

### 6. Sponge Demand/Materials Balance Constraint

This constraint combines the materials balance relationship existing between titanium sponge and metal production with titanium sponge demand. The input-output coefficient,  $a^{s,m}$ , measures the quantity of titanium sponge needed to produce one unit of titanium metal. If a country produces titanium metal then shipments of titanium sponge to that country must be sufficient for its level of metal production. Clearly, if a country is to produce titanium metal then it must demand titanium sponge. Hence, the set of countries producing metal,  $m$ , must be equal to the set of countries demanding sponge,  $s'$ .

$$\sum_{i \in s} x_{ij}^{s,m} \geq a^{s,m} \sum_{j \in m'} x_{ij}^{m'} \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in m \\ \text{for all } j \in s' \\ \text{where } m = s' \end{array} \quad (6)$$

### 7. Metal Demand Constraint

Demand for titanium metal is assumed to be exogenous. This assumption from the fact that the present model is short run in nature. The following

constraint ensures that the total amount of titanium metal shipped from all of the  $i$  supplying countries to the  $j^{\text{th}}$  metal demanding country is sufficient for the level of metal demand in country  $j$ .

$$\sum_{i \in m} x_{ij}^m \geq D_j^m \quad \text{for all } j \in m' \quad (7)$$

#### 8. Binary Integer Constraint for Ore Production

The binary integer variable  $y_i^o$  represents the decision to produce or not produce ore in country  $i$ , where  $i$  is an element of the set of countries with titanium ore reserves, ( $i \in o$ ). If a country is selected for ore production, then  $y_i^o$  is equal to one. However, if a country is not selected for ore production, then  $y_i^o$  is equal to zero.

$$y_i^o = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^o > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in o \quad (8)$$

#### 9. Binary Integer Constraint for Sponge Production

The binary integer variable  $y_i^s$  represents the decision to produce or not produce sponge in country  $i$ , where  $i$  is an element of the set of countries with sponge production capacity, ( $i \in s$ ). If a country is selected for sponge production, then  $y_i^s$  is equal to one. However, if a country is not selected for sponge production, then  $y_i^s$  is equal to zero.

$$y_i^s = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^s > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in s \quad (9)$$

#### 10. Binary Integer Constraint for Metal Production

The binary integer variable  $y_i^m$  represents the decision to produce or not produce titanium metal in country  $i$ , where  $i$  is an element of the set of countries with metal production capacity, ( $i \in m$ ). If a country is selected for metal production, then  $y_i^m$  is equal to one. However, if a country is not selected for metal production, then  $y_i^m$  is equal to zero.

$$y_i^m = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij}^m > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{for all } i \in S \quad (10)$$

#### 11. Nonnegativity Constraints

All shipments of commodities in the model between supplying and demanding countries must be nonnegative. Constraints (11), (12), and (13), ensure, respectively, that shipments of titanium ore, sponge, and metal in the model are either positive or equal to zero.

$$x_{ij}^o \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in O \\ \text{for all } j \in O' \end{array} \quad (11)$$

$$x_{ij}^s \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in S \\ \text{for all } j \in S' \end{array} \quad (12)$$

$$x_{ij}^m \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{for all } i \in M \\ \text{for all } j \in M' \end{array} \quad (13)$$

#### EMPIRICAL RESULTS AND CONCLUSIONS

The objective of this study is the determination of the optimal worldwide spatial distribution of production and subsequent trade patterns for the multistage titanium industry. To accomplish this task, a mixed integer linear programming model was developed to estimate the cost minimizing location of titanium ore, sponge, and ingot production. Afterward, the results obtained with the program were used to test the hypothesis that the actual location and level of production at each stage of titanium metal manufacture was no different than the optimal pattern of production in 1984.

The estimated cost minimizing patterns of production and trade in titanium minerals in 1984 are illustrated in tables 1 and 2. For the first stage of titanium metal manufacture, specifically, that of ore extraction and beneficiation, the optimal solution discloses that only one country would have engaged in titanium ore production in 1984. Specifically, Australia would have supplied all the rutile and ilmenite necessary for titanium metal manufacture. Such a result is reasonable in light of the high

capital costs associated with titanium ore extraction and beneficiation, as

TABLE 1  
 OPTIMAL (COST MINIMIZING) SHIPMENTS OF RUTILE, 1984  
 (Data in short tons)

FROM \ TO	E. U.S.A.	W. U.S.A.	JAPAN	U.K.	TOTAL SUPPLY
E. AUSTRALIA	20900.0	52800.0	76859.2	12100.0	162659.2
E. U.S.A.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
INDIA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
REP. OF SOUTH AFRICA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U.S.S.R.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SIERRA LEONE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLE 2

OPTIMAL (COST MINIMIZING) SHIPMENTS OF ILMENITE, 1984

(Data in short tons)

FROM \ TO	U.S.S.R	PEOPLES REP. OF CHINA	TOTAL SUPPLY
W. AUSTRALIA	130000.0	7500.0	137500.0
U.S.S.R	0.0	0.0	0.0
PEOPLES REP. OF CHINA	0.0	0.0	0.0

well as the vast economic reserves of these minerals present along the eastern and western coasts of Australia. In addition, no tariffs were levied upon Australian rutile imports by any of the rutile consuming countries in the model. Similarly, for those few countries which did impose tariffs on ilmenite imports, the duty was extremely low. Furthermore, the relatively low transport costs associated with these minerals effectively eliminates the locational advantage held by other nations endowed with titanium ores yet in closer proximity to titanium mineral consumption points.

In interpreting the aforementioned results concerning optimal titanium ore production and trade, it is important to recall that the model developed for the present study places primary emphasis upon titanium metal markets. Pigment demand for titanium minerals was not included in the model due to the dissimilarity of this commodity to titanium metal. Furthermore, since only ten percent of the titanium minerals consumed worldwide are used to produce titanium metal, the probability that the present model underestimates production and trade in rutile and ilmenite must be given proper consideration.

For the second stage of titanium metal manufacture, the cost minimizing model solution predicts that titanium sponge production would have taken place in all five countries that possessed titanium sponge production capacity in 1984. By far the greatest level of titanium sponge production, 52,000 short tons, would have taken place in the Soviet Union, while Japan and the United States would have also been significant producers of the metal under the cost minimization criterion. The optimal spatial distribution of titanium sponge production and subsequent trade patterns for 1984 are shown in table 3.

In addition, the model's results indicate that international trade in titanium sponge would chiefly be conducted by the Japanese. It was estimated that Japan would ship significant quantities of titanium sponge to the Soviet Union, West Germany, and the United States. Moreover, under the optimal, cost minimizing solution, Japan would be the sole foreign supplier of titanium sponge to the United States. Such a result is, in fact, quite realistic given the fact that between 1983 and 1986, 95 percent of U.S.

TABLE 3

OPTIMAL (COST MINIMIZING) SHIPMENTS OF TITANIUM SPONGE, 1984

(Data in short tons)

TO FROM	E. U.S.A.	W. U.S.A.	JAPAN	U.K.	U.S.S.R.	W. GERMANY	TOTAL SUPPLY
E. U.S.A.	0.0	9500.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9500.0
W. U.S.A.	0.0	24000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24000.0
JAPAN	0.0	1936.0	14000.0	0.0	15000.0	4000.0	34936.0
U.K.	0.0	0.0	0.0	5000.0	0.0	500.0	5500.0
U.S.S.R.	0.0	0.0	0.0	0.0	52000.0	0.0	52000.0
PEOPLES REP. OF CHINA	0.0	0.0	0.0	0.0	3000.0	0.0	3000.0

titanium sponge importa came from Japan.<sup>4</sup>

In general, those countries which engaged in titanium sponge production also tended to be major consumers of the metal. Therefore, demand for titanium sponge was typically met by domestic producers, and any excess supply was exported. Given the higher transport costs associated with the shipment of titanium sponge as well as the fact that tariffs on titanium sponge reached as high as 25 percent *ad valorem* for some countries included in the model,<sup>5</sup> the aforementioned model results are quite sound.

In the final stage of titanium metal manufacture, the estimated cost minimizing location of ingot production and subsequent trade flows were found to be similar to those estimated for titanium sponge production. In the optimal solution, titanium ingot manufacture would take place in all of the countries possessing ingot production capacity in 1984. The highest level of output was estimated to take place in the Soviet Union. As in the case of titanium sponge trade, demand for titanium ingot in those countries which were also producers of the metal tended to be met by domestic firms. The optimal location of production in titanium ingot and patterns of international trade in 1984 are shown in table 4.

Following the determination of the optimal production and trade patterns for the multistage titanium industry, the data generated by the mixed integer program solution were used to test the hypothesis that the optimal spatial distribution of production at each stage of processing was not different from the actual distribution in 1984. The Wilcoxon Matched-Pairs Signed-Ranks Test was used to analyze the differences between the actual and optimal production levels at each stage of titanium ore and metal processing. This nonparametric statistical test takes into consideration both the direction and the magnitude of the differences between pairs of data.<sup>6</sup>

---

4 U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodity Summaries*, (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1988), 170.

5 International Customs Tariffs Bureau, *International Customs Journal*, (Brussels, Belgium: International Customs Tariffs Bureau).

6 See, for example, Sidney Siegel, *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957), 77-83.

TABLE 4

OPTIMAL (COST MINIMIZING) SHIPMENTS OF TITANIUM INGOT, 1984

(Data in short tons)

TO \ FROM	E. U.S.A.	W. U.S.A.	JAPAN	U.K.	W. GERMANY	U.S.S.R.	FRANCE	ITALY	CANADA	TOTAL SUPPLY
E. U.S.A.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W. U.S.A.	17718.0	17718.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35436.0
JAPAN	0.0	0.0	14000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14000.0
U.K.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	500.0	4500.0	0.0	5000.0
U.S.S.R.	0.0	0.0	1000.0	2500.0	7500.0	47500.0	0.0	4000.0	7500.0	70000.0
W. GERMANY	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4500.0	0.0	0.0	4500.0

The actual and optimal levels of rutile, ilmenite, titanium sponge, and titanium ingot production for 1984 are presented in tables 5 through 8, respectively. After conducting the Wilcoxon Test on each of the aforementioned titanium commodities, it was found that the null hypothesis (the actual location and level of production was not different from the optimal distribution) could be rejected for the titanium ore and sponge stages of production.

Given the results of this test, it can be concluded that for the ore and sponge stages of titanium metal manufacture, factors other than production and distribution costs influenced production decisions for these titanium commodities. Without inside industry information, it is difficult to precisely pinpoint the specific nonprice factors which influenced managers production decisions at these stages of titanium production. However, in the case of ore production, the results obtained with the Wilcoxon test must be tempered by the fact that pigment demand for titanium ores was excluded from the present model. Therefore, the estimates derived for titanium ore production and demand with this model are substantially lower than actual figures. In the case of titanium sponge production, the deviation between the optimal and actual production choices may possibly be the result of the risk aversion on the part of titanium sponge consumers who are willing to pay premium prices in order to maintain secure supplies of the metal.

At the final stage of titanium metal manufacture, ingot production, the null hypothesis was accepted. This would indicate that the actual spatial location of titanium ingot production did not differ significantly from the cost minimizing distribution. It can, therefore, be concluded that this stage of titanium metal manufacture tended to locate at those sites where the combined costs of production and distribution were minimized.

TABLE 5  
 ACTUAL AND OPTIMAL (COST MINIMIZING) PRODUCTION OF  
 RUTILE BY COUNTRY, 1984  
 (Data in short tons)

Country	Actual <sup>1</sup> Production	Optimal Production
U.S.A.	W	0.0
Australia	200000.0	162659.2
India	8000.0	0.0
Sierra Leone	101000.0	0.0
Rep. of South Africa	62000.0	0.0
Sri Lanka	9000.0	0.0
U.S.S.R.	11000.0	0.0

Note: W denotes data withheld to avoid disclosing proprietary company data.

<sup>1</sup> Source: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodity Summaries*, (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1986), 133.

TABLE 6  
 ACTUAL AND OPTIMAL (COST MINIMIZING) PRODUCTION OF  
 ILMENITE BY COUNTRY, 1984  
 (Data in short tons)

Country	Actual <sup>1</sup> Production	Optimal Production
U.S.A.	W	0.0
Australia	1210000.0	137500.0
Brazil	55000.0	0.0
Finland	184000.0	0.0
India	165000.0	0.0
Malaysia	215000.0	0.0
Norway	606000.0	0.0
Sri Lanka	88000.0	0.0
China	154000.0	0.0
U.S.S.R.	485000.0	0.0

Note: W denotes data withheld to avoid disclosing proprietary company data.

1 Source: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodity Summaries*, (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1986), 73.

TABLE 7  
 ACTUAL AND OPTIMAL (COST MINIMIZING) PRODUCTION OF  
 TITANIUM SPONGE BY COUNTRY, 1984  
 (Data in short tons)

Country	Actual <sup>1</sup> Production	Optimal Production
U.S.A.	24326.0	33500.0
Japan	16938.0	34936.0
U.K.	2500.0	5500.0
U.S.S.R.	46000.0	52000.0
Peoples Rep. of China	2000.0	3000.0

1 Source: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodity Summaries*, (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1986), 169.

TABLE 8  
 ACTUAL AND OPTIMAL (COST MINIMIZING) PRODUCTION OF  
 TITANIUM INGOT BY COUNTRY, 1984  
 (Data in short tons)

Country	Actual <sup>1</sup> Production	Optimal Production
U.S.A.	32840.1	35436.0
Japan	18631.8	14000.0
U.K.	3375.0	5000.0
U.S.S.R.	62100.0	70000.0
West Germany	3375.0	4500.0

1 Actual data unavailable. Estimates based on 1.35 times actual sponge production in 1984.

APPENDIX A  
ASSUMPTIONS

In formulating the mixed integer program used in this study, a number of assumptions were made. These assumptions may be classified into one of two groups: (a) assumptions which are common to the methods of linear programming, or, (b) assumptions which are unique to the titanium production and trade model developed for this study. In the following sections, each of the assumptions is stated and any underlying economic implications associated with an assumption are discussed.

STANDARD LINEAR PROGRAMMING ASSUMPTIONS

The following are assumptions typically made in linear programming problems.<sup>7</sup>

1. **Certainty:** It is assumed that all constants contained in the objective function and the constraints are known with certainty.
2. **Nonnegativity:** Only nonnegative activity levels are feasible. Therefore, the non-integer choice variables in the model,  $x_{ij}^o$ ,  $x_{ij}^s$ ,  $x_{ij}^n$ , which respectively represent flows of titanium ore, sponge, and ingot from producing country  $i$  to consuming country  $j$ , can take on only positive values or a value of zero.
3. **Linear Objective Function:** It is assumed that the objective function is expressed in terms of a linear function. This assumption is consistent with the underlying Leontief production technology employed in the model. More specifically, given the Leontief production function

$$f(x_1, x_2) = \min(ax_1, bx_2)$$

where  $x_1$  and  $x_2$  are inputs, and  $a$  and  $b$  represent the strictly positive

---

<sup>7</sup> Narendra Paul Loomba and Ephraim Turban, *Applied Programming for Management*, (New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1974), 56-57.

input intensities of factors  $x_1$  and  $x_2$ , respectively, the corresponding dual cost function is of the form

$$c(w_1, w_2, y) = w_1 y/a + w_2 y/b = (w_1/a + w_2/b)y$$

where  $w_1$  and  $w_2$  represent input prices of factors  $x_1$  and  $x_2$  respectively,  $y$  is the level of output, and  $a$  and  $b$  respectively measure the strictly positive input intensities of factors  $x_1$  and  $x_2$ .

4. **Linear Constraints:** The constraints employed in the problem are expressed in terms of linear inequalities.
5. **Proportionality:** The linearity of the objective function and each of the constraints in the model results in proportionality in the system. This implies: (a) the contribution to the objective function of each activity is directly proportional to the level of that activity, and (b) the use of a factor by each activity is directly proportional to the level of that activity. The constants of proportionality in the constraints, therefore, indicate constant returns to scale in the system, which is, in turn, consistent with the underlying Leontief production technology.
6. **Additivity:** The total of all activities is equal to the sum of each individual activity. Therefore, the total cost incurred by a series of activities, in the present case, titanium ore, sponge, and metal production, would be equal to the summation of the cost of each of the aforementioned individual activities. Also, the assumption of additivity would imply that the total utilization of a resource is equal to the sum of the resource's use by each of the individual activities.
7. **Maximization (or Minimization) of a Single Goal:** It is assumed that a single goal can be identified as the objective of the linear programming problem. In the model developed for this study, minimization of the costs incurred in the production and distribution

of titanium ore, sponge, and ingot is specified as the singular goal of the mixed integer program.

8. Divisibility: With the exception of the binary (0-1) variables identified in the program,  $y^o_i$ ,  $y^s_i$ ,  $y^m_i$ , which indicate whether production is taking place in location  $i$ , it is assumed that the other choice variables in the model,  $x^o_{ij}$ ,  $x^s_{ij}$ ,  $x^m_{ij}$ , which represent flows of commodities from producing country  $i$  to consuming country  $j$ , are continuous.

ASSUMPTIONS UNIQUE TO THE TITANIUM PRODUCTION  
AND TRADE MODEL

In addition to the standard linear programming assumptions cited in the previous section, the following assumptions are also used in formulating the titanium production and trade model.

1. The location and the magnitude of titanium ore reserves, sponge production capacity, and metal production capacity are assumed exogenous in the model.
2. The cost function at each stage of production is based on a Leontief production technology with input intensities fully specified *a priori*. However, in an effort to accurately model production in the international titanium industry, the cost function differs slightly in centrally planned economies engaging in titanium sponge production. This is due to the fact that titanium sponge producers in China and the soviet Union employ ilmenite as the natural resource input, whereas in all other titanium sponge producing countries, rutile is used as the mineral feedstock. By making this distinction in the model's cost function, it is felt more precise empirical results will be obtained.
3. The input-output coefficients linking ore demand and sponge

production,  $a^{o,s}$ , and sponge demand and metal production,  $a^{s,m}$ , are assumed to be identical across producing countries.

4. Demand for titanium metal in each consuming country is exogenous, while demands for titanium ore and sponge are endogenous.
5. Input prices in countries with titanium reserves or production capacity are assumed exogenous.
6. Transport costs are assumed to be a linear function of the distance between supplying and demanding countries.
7. There is no transshipment of titanium commodities in the model. This is consistent with the triangular inequality which states

$$t_{ij} \leq t_{ik} + t_{kj}$$

where  $t_{ij}$  is the unit transportation cost for a commodity shipped from site  $i$  to site  $j$ ,  $t_{jk}$  is the unit transportation cost for a commodity shipped from site  $j$  to site  $k$ , and  $t_{kj}$  is the unit transportation cost for a commodity shipped from site  $k$  to site  $j$ .

8. Intracountry transport costs are assumed to be zero. This assumption effectively collapses all countries in the model into production or consumption points and thereby implies a punctual approach to location theory. This approach to location theory is closely tied to the doctrine of comparative advantage, in so much as the pattern of production location across multiple geographic points is based upon predetermined relative resource endowments and received prices at the points.
9. Tariffs on all titanium commodities are assumed to be exogenous.

PROTEZIONE AMBIENTALE NELLA  
PRODUZIONE DI TITANIO

Giuseppe Garrasi  
I.R.E.S. - TERNI

VII MEETING INTERNAZIONALE SUL TITANIO  
TORINO - 15 Novembre 1991

## INDICE

- 1.0. Introduzione
- 2.0. I processi di produzione del tetracloruro di titanio:  
Generalità
- 2.1. I sottoprodotti di reazione
- 2.2. La purificazione del tetracloruro di titanio
- 3.0. Alcuni noti processi industriali di produzione del  
TiCl<sub>4</sub> e della spugna di titanio
- 3.1. I processi KROLL e HUNTER
- 3.2. L'Impianto OSAKA TITANIUM Co. L.t.d.
- 3.3. L'Impianto TOHO TITANIUM Co. L.t.d.
- 3.4. L'Impianto della DEESIDE Titanium L.t.d.
- 3.5. I processi elettrolitici
- 4.0. Il futuro impianto della TITANIA S.p.A.
- 4.1. Il processo elettrolitico Ginatta per la preparazione  
della spugna di titanio
- 5.0. Conclusioni
- 6.0. Bibliografia

1.0. - Introduzione

Vengono passati in rassegna i processi di produzione del titanio, con particolare riguardo a quella parte di essi connessa con la prevenzione dall'inquinamento.

Le linee di processo relativo alla produzione e purificazione del tetracloruro di titanio, prodotto intermedio per la produzione del titanio, vengono descritte con particolare riguardo alla produzione e innocuizzazione dei sottoprodotti sia derivanti dalle impurezze contenute nelle materie prime sia derivanti dalle condizioni di processo in se.

Varie iniziative industriali messe in atto da importanti produttori giapponesi ed europei sono illustrate e raffrontate.

Nel nostro paese un processo di produzione realizzato da Ginatta e Italimpianti sorgerà a Terni. Prendendo lo spunto anche da quanto è stato realizzato in altri paesi vengono suggerite iniziative di carattere impiantistico volte a minimizzare l'impatto ambientale.

## 2.0. - I processi di produzione del tetracloruro di titanio

### Generalità

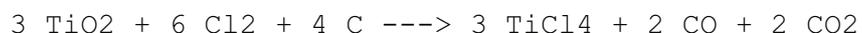
Il minerale di titanio impiegato per la produzione del tetracloruro è il rutilio.

Questo minerale contiene il 95% circa di biossido di titanio e il 5% circa di altri ossidi di metalli come lo zirconio, il niobio, l'alluminio, il ferro, il vanadio, il cromo, lo stagno, e forse altri. Il coke di petrolio, altro ingrediente del processo, contiene in genere l'1% di solfo, forse anche piccole quantità di fosforo.

Il cloro invece, ottenuto elettroliticamente, è praticamente esente da impurità.

Cercheremo di chiarire nel seguito quali tipi di sottoprodotti dipendono dalla purezza delle materie prime di partenza e quali invece dipendono dalle condizioni di reazione.

La reazione di clorurazione del biossido di titanio, (carboclorurazione) che avviene secondo l'equazione stechiometrica



è condotta a temperature fra 800 e 1000°C in appositi forni con modalità differenti che potremo definire con una certa approssimazione a carica statica o a carica dinamica.

Nel primo caso la materia prima solida è introdotta nel reattore sotto forma di bricchette, in cariche successive, mentre nel secondo caso (letto fluido) è introdotta in continuo in pezzatura fine. In uno dei primi processi descritti in letteratura (4), la carica solida, eventualmente preriscaldata, costituita da bricchette di rutilio e coke è introdotta dall'alto del forno, a intervalli regolari, attraverso un sistema di alimentazione a tenuta di gas; i prodotti gassosi costituiti da tetracloruro di titanio, ossido di carbonio, anidride carbonica, cloro in eccesso, oltre a numerosi sottoprodotti, escono di continuo dall'alto del forno e, dopo separazione delle polveri trascinate, sono

raffreddati per condensare il  $TiCl_4$ . Il forno di clorurazione è mantenuto alla temperatura del processo in parte dal calore svolto dalla reazione e in parte per riscaldamento elettrico. Il processo deve essere periodicamente interrotto poiché le bricchette si ricoprono di uno strato di cloruri non volatili che rallentano la reazione. Ci risulta che questo processo è stato abbandonato per il più recente processo a letto fluido. Nel processo a letto fluido la carica solida è introdotta con continuità a granulometria sufficientemente fine da poter essere tenuta sospesa nel forno per mezzo del cloro.

Data la fine granulometria dei solidi la superficie disponibile è elevata e la reazione procede velocemente senza inconvenienti e in maniera quantitativa.

Poiché una parte dei reagenti solidi sospesi trascina dall'alto del forno insieme ai gas di processo e alle polveri prodotte dalla reazione, si provvede a ricircolare parte dei solidi fermati da uno a più cicloni a valle del forno.

#### 2.1. - I sottoprodotti di reazione

Numerosi sono i prodotti secondari che vengono generati nel corso della reazione di carboclorurazione, alcuni dei quali dipendono dalla purezza delle materie prime di partenza, altri sono impliciti nel processo di clorurazione. I sottoprodotti clorurati metallici derivano generalmente dal rutilio (in piccola misura anche dal carbone), mentre i composti solforati e fosforati derivano dal carbone.

I sottoprodotti costituiti esclusivamente da carbonio ossigeno e cloro si formano nel processo. La presenza, eventuale di composti contenenti oltre a carbonio, cloro e ossigeno, anche idrogeno è dovuta alla presenza di tracce di umidità nelle materie prime.

I cloruri e gli ossicloruri che si formano possono essere suddivisi in due categorie: quelli non volatili e quelli volatili.

I prodotti non volatili sono quelli che si accumulano nelle polveri che vengono separate a valle del forno di clorurazione, costituiti essenzialmente da cloruro ferroso, cloruro di cromo, cloruri di magnesio, calcio, sodio, potassio.

I prodotti volatili possono essere suddivisi in tre categorie:

a - cloruro ferrico, cloruri di zirconio, niobio, alluminio, cloruri e ossicloruri di vanadio, ossicloruri di cromo, escono dal forno e vengono condensati insieme al  $TiCl_4$ .

Fra questi, alcuni si separano come solidi, rimanendo in sospensione nel  $TiCl_4$  e devono essere allontanati meccanicamente (decantazione o filtrazione o centrifugazione).

I composti di vanadio e alluminio che rimangono in soluzione nel  $TiCl_4$  devono essere allontanati per via chimica, a questo proposito sono citati vari sistemi fra cui trattamenti con  $H_2S$  o con rame o più recentemente la complessazione con idrocarburi paraffinici.

b - tutti i vari altri prodotti che a ragione del loro inferiore punto di ebollizione rimangono nella corrente gassosa e quindi riescono a condensare a temperature inferiori a quella di condensazione del  $TiCl_4$  (come nel caso di una condensazione frazionata).

Fra questi il tetracloruro di carbonio, il tricloruro di fosforo, il cloruro di tionile, il cloruro stannico, il tetracloruro di silicio, il monocloruro di zolfo, ecc.

c - I prodotti incondensabili come ossido di carbonio, anidride carbonica, cloro, oltre a solfuro di carbonio, solfuro di carbonile, fosgene e suoi derivati (provenienti da processi transitori di avviamento) che si riescono a condensare solo a temperature alquanto inferiori allo zero (ad es. nella condensazione frazionata), ma che in pratica tendono a rimanere nella corrente dei gas incondensabili.

I prodotti gassosi volatili sono i più pericolosi.

Tranne che per alcuni di essi come CO, COS, CS<sub>2</sub> (6), per tutti gli altri disponibili solo informazioni qualitative. La recente letteratura (5) riporta inoltre notizia dell'accumulo di esaclorobenzene nelle code di distillazione del TiCl<sub>4</sub>, oltre che di sali di vanadio, che evidentemente non si riescono a bloccare completamente con i trattamenti suaccennati.

## 2.2. - La purificazione del TiCl<sub>4</sub>

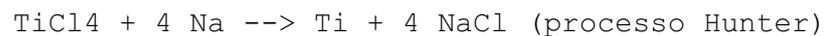
La corrente gassosa uscente dal forno di clorurazione a 800-1000°C è sottoposta a una serie di trattamenti e cioè:

- 1° separazione delle polveri
- 2° condensazione frazionata fino a -10/-20°C
- 3° distillazione frazionata

3.0. - Alcuni noti processi industriali del TiCl<sub>4</sub> e della Spugna di titanio

3.1. - I processi KROLL e HUNTER

Le due più note reazioni di riduzione del TiCl<sub>4</sub> a titanio metallico sono:



Ambedue le reazioni avvengono a temperature dell'ordine di 800-1000°C in atmosfera di argon o di olio. Ossigeno e azoto devono essere assolutamente assenti.

3.2. - L'Impianto OSAKA TITANIUM

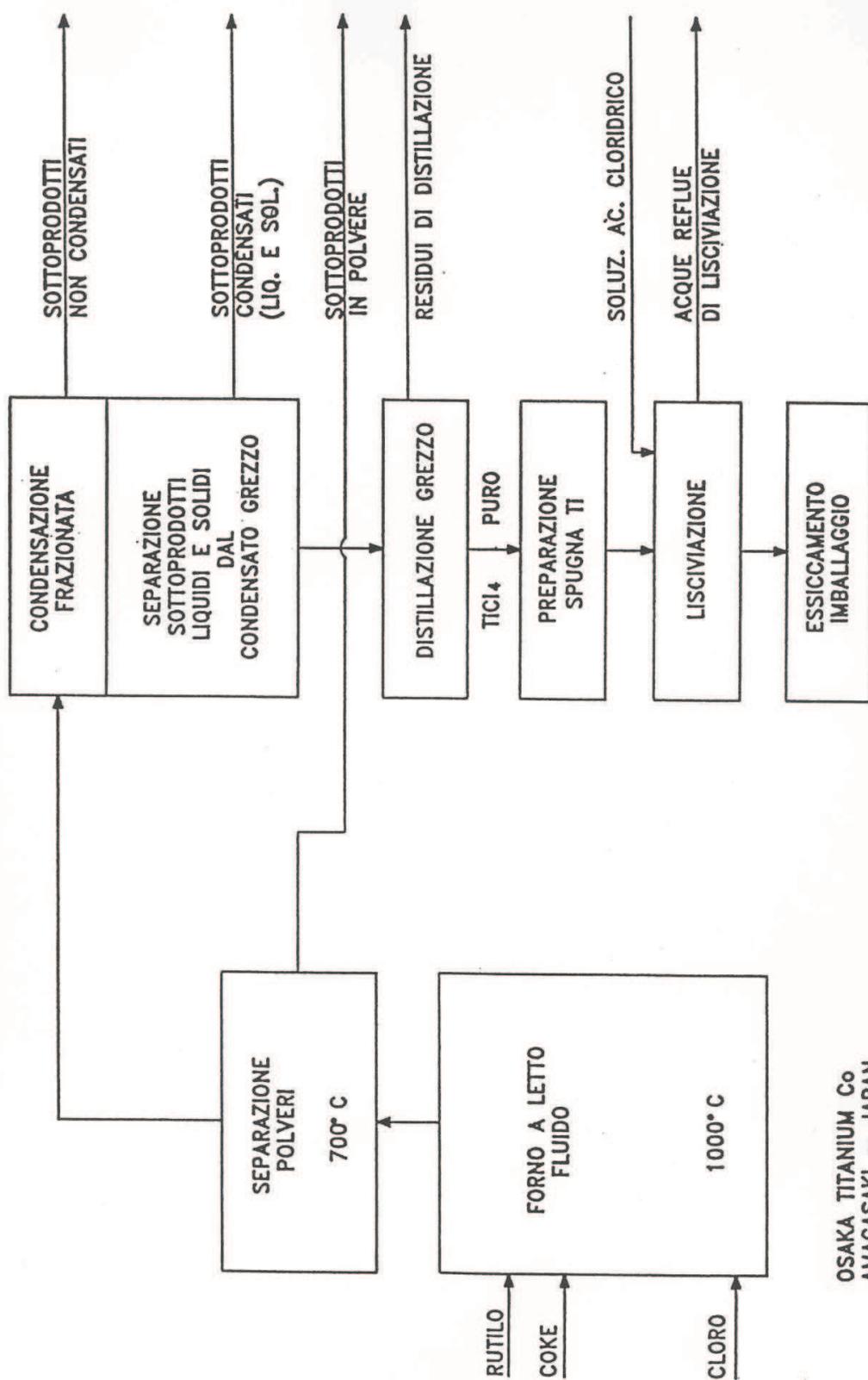
Gli schemi di fig. 1 e 2 illustrano il processo OSAKA.

3.3 - L'Impianto TOHO TITANIUM

Lo schema di fig. 3 descrive il processo TOHO.

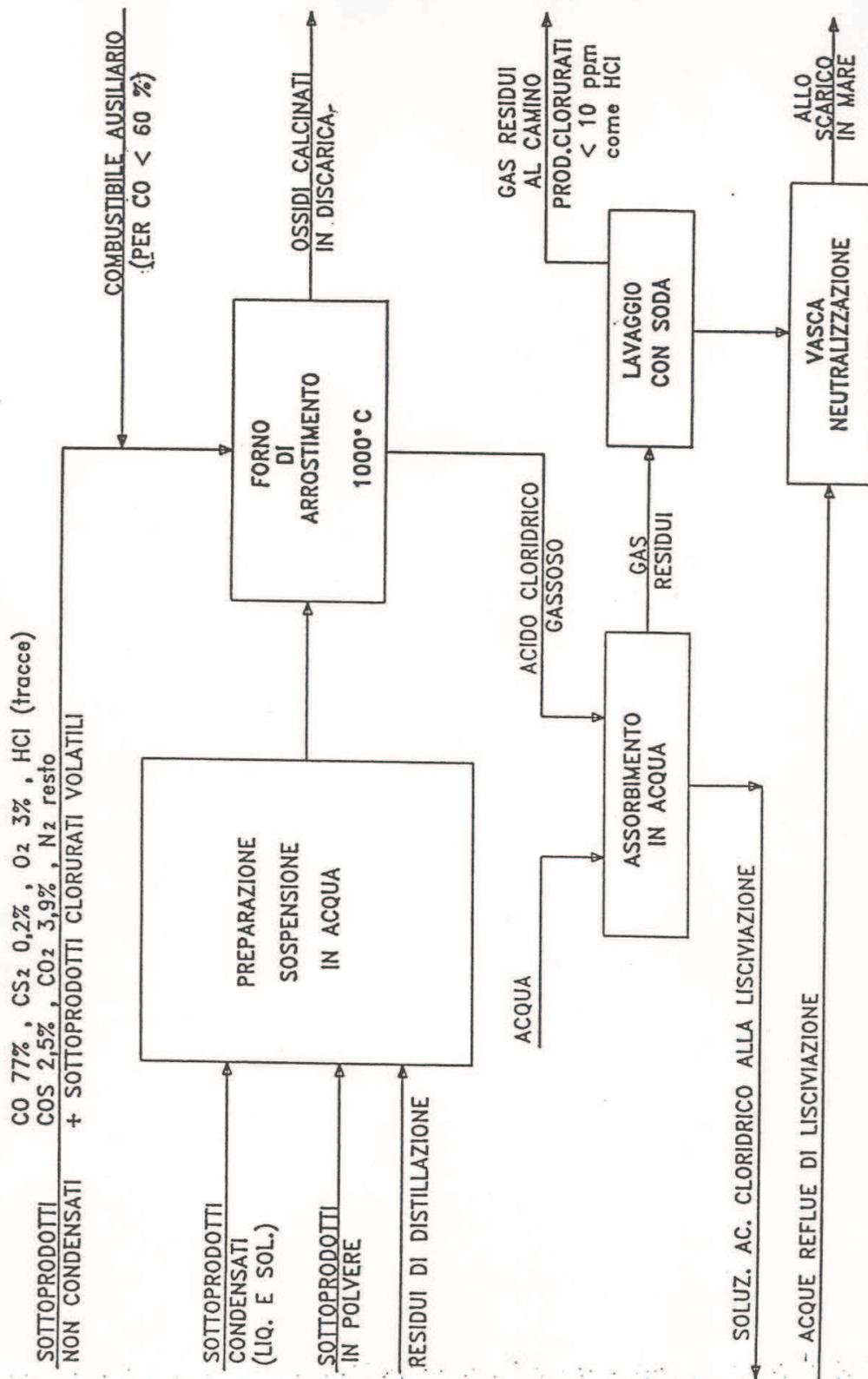
3.4. - L'Impianto della DEESIDE TITANIUM L.t.d.

La fig. 4 rappresenta lo schema dell'impianto DEESIDE.



OSAKA TITANIUM Co  
AMAGASAKI - JAPAN

FIG. 1 -SINTESI E PURIFICAZIONE DEL  $TiCl_4$  E PREPARAZIONE E PURIFICAZIONE DELLA SPUGNA DI TITANIO

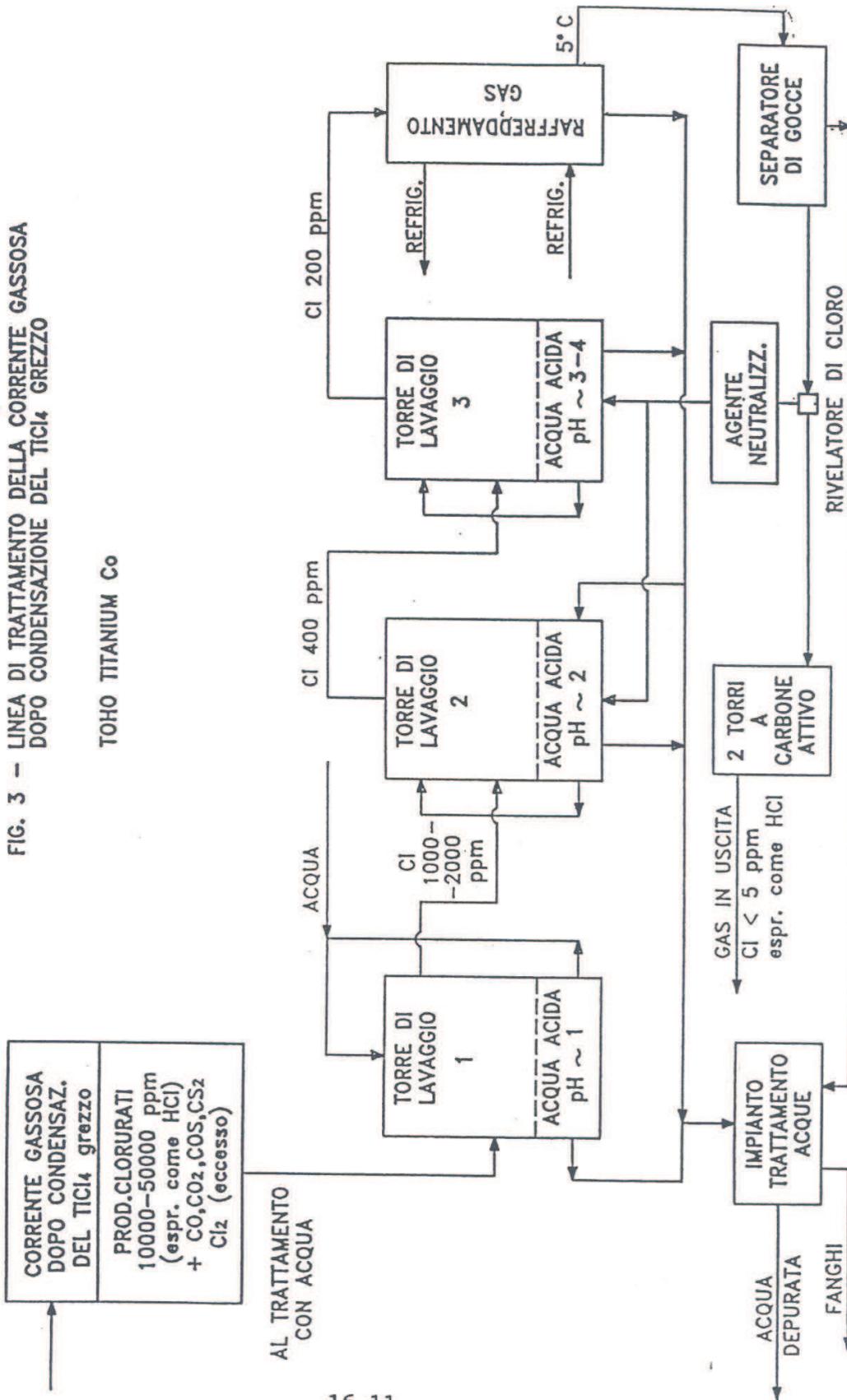


OSAKA TITANIUM Co  
AMAGASAKI - JAPAN

FIG. 2 - TRATTAMENTO EFFLUENTI

FIG. 3 - LINEA DI TRATTAMENTO DELLA CORRENTE GASSOSA DOPO CONDENSANZA DEL TICl<sub>4</sub> GREZZO

TOHO TITANIUM Co



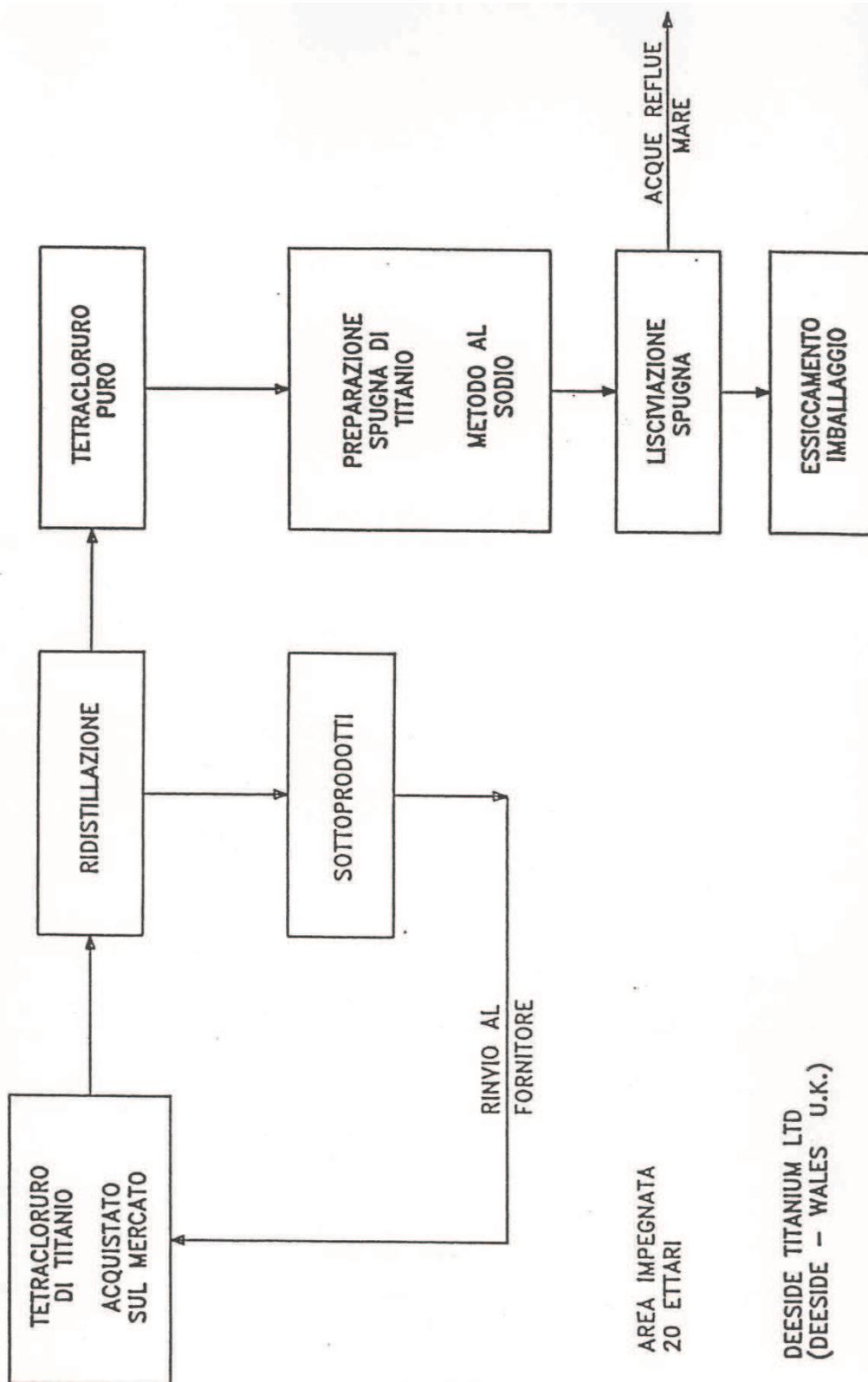


FIG. 4 - SCHEMA DELL'IMPIANTO DI PRODUZIONE DEESIDE

### 3.5. - I processi elettrolitici

Altra e più recente linea di produzione del titanio è rappresentata dalla elettrolisi di un composto alogenato del titanio (esafluotitanato di potassio, o tetrafluoruro o tetracloruro) disciolti in un eutettico di cloruri e fluoruri alcalini e alcanoterrosi; non vi sono eccessivi problemi di purificazione della spugna catodica, che una volta estratta può essere lisciviata con acido cloridrico diluito con modalità tali da impedire l'idrolisi dei composti alogenati del titanio presenti.

Il catodo di supporto può essere di acciaio, Hastelloy o titanio; l'anodo è di grafite. Il processo Ginatta è descritto nel seguito.

4.0. - Il futuro Impianto della TITANIA S.p.A.

La produzione e i consumi principali del futuro impianto (330 giorni/anno pari a 7920 ore lavorative) saranno i seguenti:

-	Produzione spugna titanio	4.200 t/a
-	Produzione di tetracloruro di titanio	17.000 t/a
-	Consumo di rutilio (TiO <sub>2</sub> 95% circa)	8.000 t/a
-	Consumo di coke di petrolio (C 99%, 8 1% stimato)	2.200 t/a
-	Consumo di cloro (Cl <sub>2</sub> 99,9%) di cui 12.900 tonn. circa saranno riciclate dall'impianto di elettrolisi. Il consumo netto di cloro dovrebbe aggirarsi sulle 600-700 tonn./anno.	13.500 t/a
-	Consumo di NaCl per elettrolisi	1.450 t/a
-	Consumo di acido ossalico per la lisciviazione (stimato)	840-(280*) t/a
-	Consumo di acido cloridrico per la lisciviazione (stimato) (soluzione commerciale al 33% di HCl) (850*mc/a)	2.500-2.700 mc/a
-	Consumo Argon	436.000 N mc/a

\* utilizzando un lisciviatore a letto fluido solido-liquido.

Le fig. 5 e 6 riportano lo schema del processo previsto per l'impianto della Soc. TITANIA Terni.

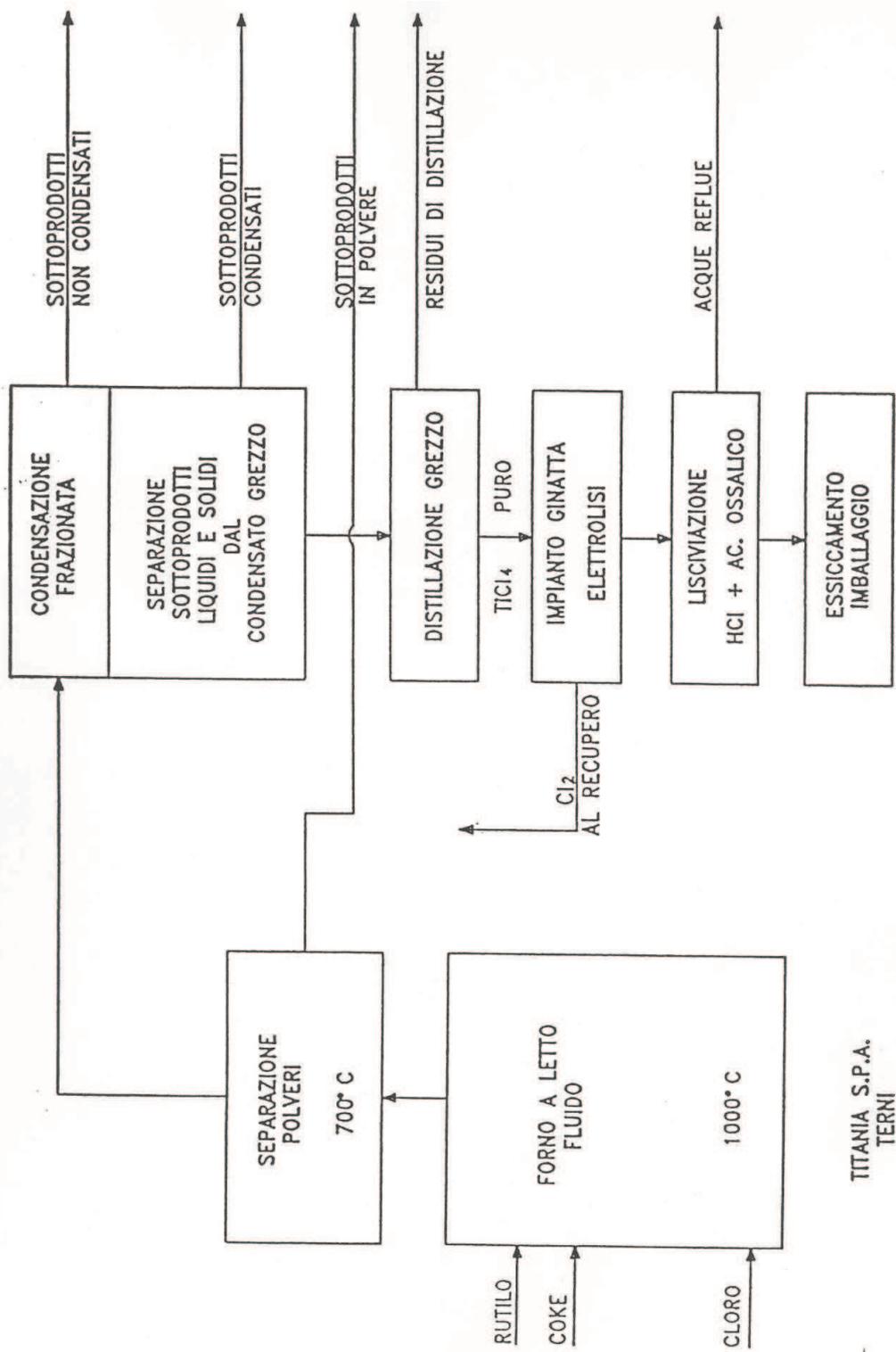


FIG. 5 - SINTESI E PURIFICAZIONE DEL TICl<sub>4</sub> E PREPARAZIONE E PURIFICAZIONE DELLA SPUGNA DI TITANIO

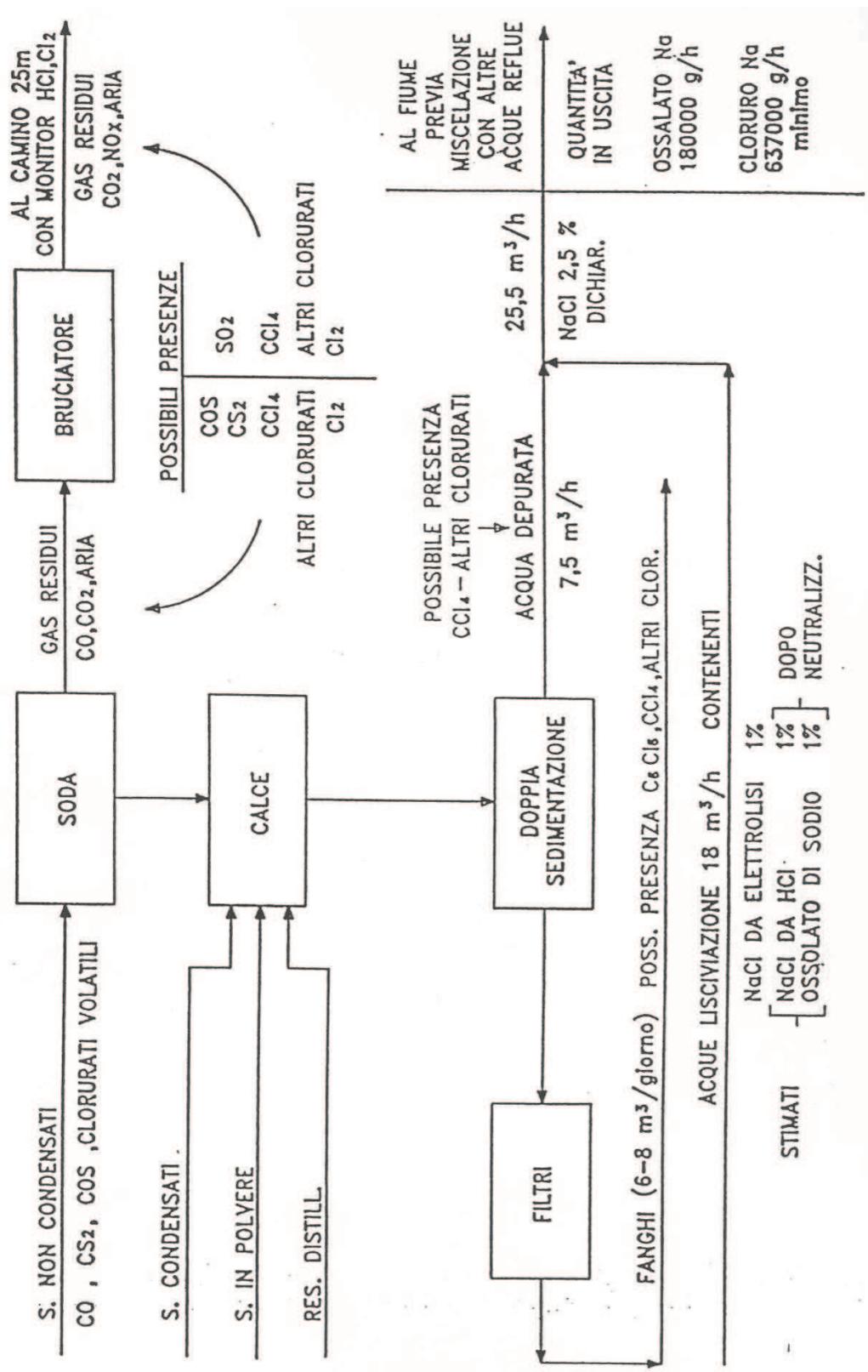


FIG. 6 - IMPIANTO TITANIA - TRATTAMENTO EFFLUENTI

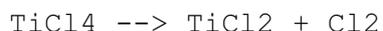
4.1. - Il processo elettrolitico Ginatta per la preparazione della spugna di titanio

Il processo elettrolitico realizzato dalla Ginatta S.p.A. impiega come elettrolita il cloruro di sodio fuso a 830°C.

L'impianto funziona come segue:

nella cella "di dissoluzione" ove viene alimentato il  $TiCl_4$  avviene la pre-elettrolisi.

Agli elettrodi di questa cella, uno dei quali, il catodo, costituito dallo stesso acciaio costituente la cella e l'anodo di grafite, alimentati da un circuito separato, si realizza la reazione:



Nella successiva cella "di estrazione" avviene, ad alta densità di corrente, l'elettrolisi finale:



L'elettrolita costituito da cloruro di sodio fuso alla temperatura di 830°C, dopo il riscaldamento iniziale viene mantenuto in temperatura per effetto Joule.

Il titanio si deposita ai catodi, mentre contemporaneamente il cloro si svolge agli anodi di grafite e viene pompato all'impianto di recupero del cloro.

L'elettrolita si muove dalla cella di dissoluzione alla cella di estrazione per modo convettivo. Quando il titanio depositato ad uno qualsiasi dei catodi ha raggiunto una massa predeterminata, questo viene rimosso dal bagno e per mezzo del manipolatore trasferito nella pre-camera dopo aver aperto la porta della camera di elettrolisi e aver condizionato la precamera con gas inerte.

Un dispositivo di stripping provvede quindi ad asportare il titanio depositato. Immediatamente

dopo, l'elettrodo viene riposizionato nella cella.

Il prodotto passa in un frantumatore e quindi inviato all'impianto di lisciviazione.

I granuli di titanio, dopo essiccamento a temperatura ambiente, vengono imballati sotto argon. Riguardo all'acido ossalico e al cloruro di sodio in uscita dalla lisciviazione, una recente ed importante aggiunta alla linea di processo dell'impianto TITANIA è rappresentata da due impianti di elettrodialisi per il recupero dell'acido ossalico e del cloruro di sodio che potranno essere riciclati e non più scaricati all'esterno.

## 5.0. - Conclusioni

Come accennato all'inizio, lo scopo del lavoro (13)\* esposto qui in forma estremamente sintetica, è stato di raccogliere una sufficiente massa di informazioni su ciò che importanti produttori di titanio hanno attuato ai fini della protezione ambientale e quindi, dal raffronto fra le iniziative con quanto era inizialmente previsto per l'impianto che sorgerà a Terni, far emergere considerazioni e suggerimenti utili a minimizzare l'impatto sull'ambiente. Vogliamo a questo punto sottolineare che questo è uno dei pochi casi, se non l'unico, in cui è stata effettuata una indagine conoscitiva di questo tipo per un'impianto ancora in fase di progettazione. ciò è certamente servito a far sì che molti miglioramenti ed integrazioni impiantistiche, ancorché già noti sia ai progettisti che al committente, abbiamo preso la forma concreta della pratica attuazione.

Le principali voci meritevoli di particolare attenzione dal punto di vista ambientale sono di seguito brevemente descritte, anche per quanto riguarda eventuali variazioni rispetto al progetto iniziale.

### **Cloro**

In alternativa al sistema dello stoccaggio di quantità non trascurabile di cloro (25 t e oltre) l'orientamento attuale è rappresentato dalla utilizzazione di una produzione in loco mediante impianto cloro-soda.

Sarebbe così evitato sia il trasporto su strada o per ferrovia di tale prodotto che il grosso problema dello stoccaggio.

\* In una indagine separate l'I.R.E.S.-C.G.I.L. ha passato in rassegna il mercato del titanio (14).

### **Tetracloruro di titanio**

Le quantità previste come stoccaggio sono dell'ordine di 100-200 t. Anche se i serbatoi sono provvisti di vasche di contenimento sottostanti si sta facendo strada l'intenzione di includerli in appositi locali chiusi provvisti di sistemi di abbattimento.

Intendiamo sottolineare che, anche se tutti, tecnici e non, discutono della pericolosità del cloro, anche il tetracloruro di titanio, e lo afferriamo per esperienza diretta, è un prodotto che non ha niente da invidiare al cloro.

### **Ossalato di sodio**

E' un prodotto estremamente tossico, anche in soluzione diluita, per il quale devono essere osservate opportune precauzioni e del quale devono essere evitati sversamenti all'esterno (fiume Nera). Può essere reso innocuo mediante trattamento con calce. In una recente versione del progetto è stato inserito un impianto di elettrolisi per il recupero e il riciclo di questo composto, con evidenti vantaggi sia economici, visto il suo elevato costo, che ambientali.

### **Sottoprodotti liquidi e solidi isolati nei vari passaggi del processo**

Stante l'elevata reattività dei numerosi sottoprodotti liquidi e solidi isolati nei vari passaggi e dato che tutti o quasi, svolgono, anche vivacemente ed esotermicamente acido cloridrico quando vengono in contatto con l'acqua o con l'umidità, si prevede che saranno installati sistemi sicuri sia per il loro trasferimento che per il loro trattamento con le previste soluzioni alcaline.

### **Forno a letto fluido**

Periodicamente si renderà necessario il rifacimento del forno.

Ciò comporta l'apertura del forno, lo scarico del

contenuto e del refrattario al fine di rifarlo.  
E' di grande importanza la procedura di bonifica del forno prima della sua apertura per evitare la diffusione nell'ambiente di sostanze tossiche. I materiali di risulta dello svuotamento, a parte quelli (TiO<sub>2</sub> e coke) che presumibilmente verranno recuperati, dovrebbero essere analizzati (almeno in occasione di alcuni rifacimenti) per conoscere il contenuto di metalli tossici che possono contenere. La loro messa in discarica dovrebbe tener conto di queste analisi, oltre che essere preceduta dalle note prove di cessione previste dal DPR 915.

#### **Gas residui al lavaggio alcalino dei gas di processo**

Fra i gas residui al lavaggio dei gas di processo saranno presenti, oltre naturalmente al CO, anche COS, CS<sub>2</sub> e CCl<sub>4</sub> (e simili), dei quali i primi due generano SO<sub>2</sub>, mentre il CCl<sub>4</sub> è incombustibile. Solo a temperature molto elevate quest'ultimo prodotto si scinde producendo derivati che possono essere abbattuti.

A tale scopo in una seconda revisione del progetto è previsto un post-bruciatore.

Non sappiamo però se a valle verrà installato un abbattimento a umido.

#### **Corrosione cloridrica**

Tra i prodotti che si generano nel processo, qualora nelle materie prime permanessero tracce di umidità, potrebbe essere presente in piccola quantità l'acido cloridrico. Dato che è previsto un trattamento di essiccamento, questo non dovrebbe essere un problema. Tutte le superfici metalliche esterne tuttavia saranno tendenzialmente acide per acido cloridrico generato dai prodotti che possono fuoriuscire per effetto di piccole inevitabili perdite. Questo fatto può causare seri guai col tempo in prossimità di giunti, valvole, raccordi. La difesa da questo inconveniente (che nemmeno l'uso di acciaio

inossidabile può ovviare) per i possibili indiretti effetti sull'ambiente (rottture, perforazioni, ecc.) è affidata all'impiego di rivestimenti protettivi (vernici antiacido) e all'adozione di materiali polimerici di vario tipo, laddove la temperatura lo consente. E' scontato che questo è un caso in cui il titanio può essere vantaggiosamente impiegato. E' soprattutto importante una attenta opera di verifica e di manutenzione.

#### **Fanghi derivanti dal trattamento effluenti di processo**

Se verrà scelta la strada dello smaltimento in discarica i fanghi dovrebbero essere analizzati (composti organici clorurati in particolare e composti inorganici) oltre che sottoposti alle prescritte prove di cessione previste dal regolamento del DPR 915. Il recupero dei metalli pregiati (Zr, Nb, V, ecc.) potrebbe essere fatto mediante torcia al plasma.

#### **Impianto elettrolitico per preparazione della spugna di titanio**

A parte la tossicità dell'acido ossalico (e ovviamente dell'acido cloridrico, peraltro inferiore) a cui abbiamo accennato sopra, ci sembra di poter dire che questo impianto non dovrebbe presentare problemi ambientali in normali condizioni operative. L'impianto lavora infatti in depressione e in atmosfera di argon.

L'Argon presente ha una funzione protettiva nei confronti del titanio prodotto ad alta temperatura (830°C).

In caso di cattiva tenuta delle celle, si avrebbero infiltrazioni d'aria all'interno, cosa assolutamente da evitare, poiché ne deriverebbe un prodotto scadente.

Problemi potrebbero invece esserci in occasione di aperture di celle per operazioni a valle

(macinazione, lisciviazione, lavaggio, essiccamento) è previsto che avvengano tutte in ambiente chiuso e in atmosfera di gas inerte fino all'essiccamento del prodotto.

In linea principale, per la sua struttura, l'impianto esclude in contatto diretto dell'operazione con il processo.

ci auguriamo che questo lavoro possa essere di stimolo e di aiuto per evitare successivi e tardivi interventi correttivi, che porterebbero costi maggiori sia in termini di progettazione che di installazione.

Alcuni importanti risultati, come abbiamo visto, sono già stati raggiunti.

6.0. - Bibliografia

- 1 - Montiglio U. - PIGMENTI  
Enciclopedia della Chimica sez. 32  
ISSEDI Istituto Editoriale Int. Milano (1977)
- 2 - Barksdale J.- TITANIUM The Ronald Press. Co.  
New York (1966)
- 3 - Powell R. - TITANIUM DIOXIDE AND TITANIUM  
TETRACHLORIDE  
Neyes Dev. Cc. Park Ridge (1968)
- 4 - Mc. Quillan A.d. e Mc Quillan M.K. -  
TITANIUM p. 8  
Butterworths, London (1956)
- 5 - Cheprosov I.M. - Isz. Vyssh. Uchebn.  
Zaved., TSVETR. METALL 3, P. 111-112  
(1981); CHEM ABSTR. 95 206185J
- 6 - Masahito Setoguchi - PULLUTION PREVENTION  
FOR TITANIUM TETRACHLORIDE PLANT  
Osaka Titanium Co. L.t.d. Amagasaki, Japan  
Titanium 80, 3, 1947-1949  
3rd Int. Conf. on Titanium Kyoto (1980)
- 7 - Matsumoto Y. Aray F. -NEW PROCESS FOR THE  
TREATMENT AND CONTROL OF WASTE GAS FROM  
CHLORINATOR  
Toho Titanium Co. L.t.d. Chigasaki Plant,  
Kanagawa Pref. Japan 5th Int. Conf. on  
Titanium (1985)
- 8 - Mc Quillan A.D. e Mc Quillan M.K. -  
TITANIUM p. 19-Butterworths, London 1956
- 9 - Smith D. -A NEW EUROPEAN SOURCE OF RAW  
TITANIUM  
Deeside Titanium L.t.d. Billinton (UK)  
L.t.d. - Titanium Div., London  
Smith Int. Conf. on Titanium, Munich (1984)
- 10 - Orsello G. -INDUSTRIAL PLANT FOR THE  
PRODUCTION OF ELETTROLYTIC TITANIUM  
Ginatta Technology  
Atti dell III meeting sul titanio p. 22-31  
Torino, 5 novembre 1987

- 11 - Sax I - DANGEROUS PROPERTIES OF INDUSTRIAL MATERIALS  
Van Nostrand Reinhold Publ. Co. N.Y.
- 12 - IMPIANTO DI PRODUZIONE TITANIO - TERNI  
Titania S.p.A. - Italimpianti - Relazione FFC 6987 (pagg. 27)
- 13 - Garrasi G. -Problematiche ambientali connesse con la produzione del Titanio  
Istituto di ricerche economiche e sociali (I.R.E.S.-C.G.I.L.)  
Terni - Marzo 1990
- 14 - Gibellieri E. - Il mercato del Titanio e le sue prospettive di riferimento ai settori d'impiego.  
Istituto di ricerche economiche e sociali (I.R.E.S.-C.G.I.L.)  
Terni - Marzo 1990

## PRESENTING A NEW TITANIUM FOUNDRY

### IN EUROPE

By eng. ION GREAVU  
METAV S.A.-Bucharest

#### 1. INTRODUCTION

In Eastern Europe, namely in Roumania, it is projected to be finished the construction of a new titanium foundry which will produce casting parts using investment casting with lost wax process, casting in rammed graphite moulds, as well as in metallic moulds, the metallic material being elaborated starting from titanium sponge.

The achievement of this foundry in Roumania, has been made with regard to the following reasons:

- the possibility to obtain a high grade of using of titanium sponge which will be made in Roumania with domestic resources;

- to cover Roumanian necessities for titanium casting parts, required by aeronautical, chemical, medical and other industries.

The foundry will be achieved based on a licence bought in the same time with the main equipments from the Peoples Republic of China.

The decision to establish this foundry in METAV S.A. has been taken due to the possibilities of using the facilities already existent, with technical equipments at the level of aeronautical requirements for the following activities:

- dies and patterns making possibilities;
- chemical composition analyse;
- nondistructive controls (X-ray, dye penetrant);

- metallographic controls;
- complete mechanical tests.

All the above mentioned activities, except dies and pattern work shop which has some Roumanian equipments, are achieved with imported equipments from Western Europe, from traditional suppliers recognized on the international market.

## 2. TECHNOLOGICAL FLOW

The technological flow of the titanium foundry is presented on the page no.7.

In the technological flow, the following abbreviations has been made:

- 1 = ceramic shells;
- 2 = rammed graphite moulds;
- 3 = machined graphite moulds;
- 4 = metallic moulds;
- 5 = titanium alloy.

The operations within border lines will be made in the titanium foundry, and underlined, operations will be made on the existing facilities from METAV S.A.

## 3. ORGANIZATION AND EQUIPMENTS

The titanium foundry is organized on two levels, the first and second floor. On the second floor will be made the ceramic shells using lost wax technique, and on the first floor will be made the dewaxing of shells, graphite moulding, firing, casting, as well as ingots, and after casting operations.

To achieve the technological flow described at the point no.2, the foundry has the following types of equipments:

- wax melting tanks:                      -capacity: 100 kg/pc.;
- wax injection machines:                -type: horizontal injection;

- clamping force: 35 tons;
- injection capacity: 2 l.
- assembling benches;
- transport trolleys;
- etching equipment;
- tank for first slurry coating;
- rotary equipment for shells;
- tanks for second slurries;
- mechanical handling device for shells;
- drying tunnel;
- dewaxing unit by dissolving;
- firing furnace:
  - type: vertical, electrical heated;
  - max. working temperature: 1000 °C;
  - max. vacuum:  $1 \times 10^{-3}$  mbar;
  - working chamber dimensions:
    - $\phi 1200 \times 1600$  mm;
  - firing atmosphere: mixed gas H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>
- compacting electrodes press:
  - type: hidraulical, 2 ways action;
  - max. pressing force: 2 x 650 tf;
  - dimensions of pressed electrode:
    - $1/2\phi 105$ ;  $1/4\phi 200 \times 250$  mm;
- plasma welding machine:
  - electrode dimensions after welding:
    - $\phi 105$ ;  $\phi 200 \times 2250 - 350$  mm;
  - max. vacuum:  $1,3 \times 10^{-3}$  mbar
- VAR furnace for ingots:
  - max. weight of cast ingot: 650 kg.;
  - ingot dimensions:
    - $\phi 220 \times 1400$ ;  $\phi 380 \times 1400$  mm;

- max. vacuum:  $5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$  mbar;
- arc tension: 20 - 40 V dc;
- max. current: 10000 V.

-VAR furnace far casting:

- casting capacity: 100 Kg;
- electrode dimensions:
  - $\phi$  220 x 1400 mm;
- vacuum level:  $5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$  mbar;
- arc tension: 20 - 40 V dC;
- max. current: 20000 A;
- max. vacuum:  $1 \times 10^{-3}$  mbar;
- rotation speed of casting table:
  - 150 - 550 rpm.

-knock out hammer;

-cut-off machines;

-chemical cleaning unit;

-sand blasting equipments;

-polishing units;

-chemical polishing unit;

-welding repair unit, in Ar atmosphere;

-Hot Isostatic Press (HIP) for improving internal quality of castings, used in the same time to obtain parts from metallic powders, with the main following characteristics:

- max. working temperature: 1450 °C;
- max. working pressure: 1200 at;
- dimensions of working chamber:
  - $\phi$  5500 x 1000 mm;
- working atmosphere: Ar.

-different tools and machines for mechanical machining of small graphite moulds and components, as well as for

machining of castings;

-dimensional control gauges.

Special controls for titanium alloys and titanium castings, will be made in METAV S.A. laboratories which has very good equipments and qualified personnel for:

-dimensional control with great accuracy, performed on 3 coordinate measuring machines, profile projectors, and other specialized equipments;

-dye penetrant control on ARDROX lines, using original equipments and substances;

-X ray control on SEIFERT units;

-chemical analyses, using:

-spectrometer with photoelectric receiver in optical emission;

-spectral technique with inductively coupled plasma;

-spectrometry in atomic absorption;

-gasses dissolved analysers units.

-structural analyses, by optical microscopy methods, electronic microscopy with scanning and by transmission, microanalyses and X ray diffraction;

-mechanical tests, static and dynamic;

-mechanical tests for the determination of the material hardness by Brinell, Rockwell and Vickers methods, bending tests by shock by Charpy and Izod methods, fatigue and fracture mechanical tests, creep and relaxation tests, as well as stress corrosion tests.

Among the technological process to produce titanium alloy castings, a great attention will be paid to the recycling of metallic materials as chips, runners, risers and scraps, which will be made by:

-using at the compacting of electrodes a max. 30% of metallic scraps with the same chemical composition with the ingot wich will be made;

-using at casting, in the crucible, metallic scraps of max. 10% of the charge, with the same chemical composition of the electrode;

-proper welding of scraps to make ingots which can be used for casting of civil parts, without high chemical and mechanical requirements.

The whole process for producing titanium alloy castings, will be made under a strictly quality assurance system, to meet all technical requirements of casting parts.

## 5. CONCLUSIONS

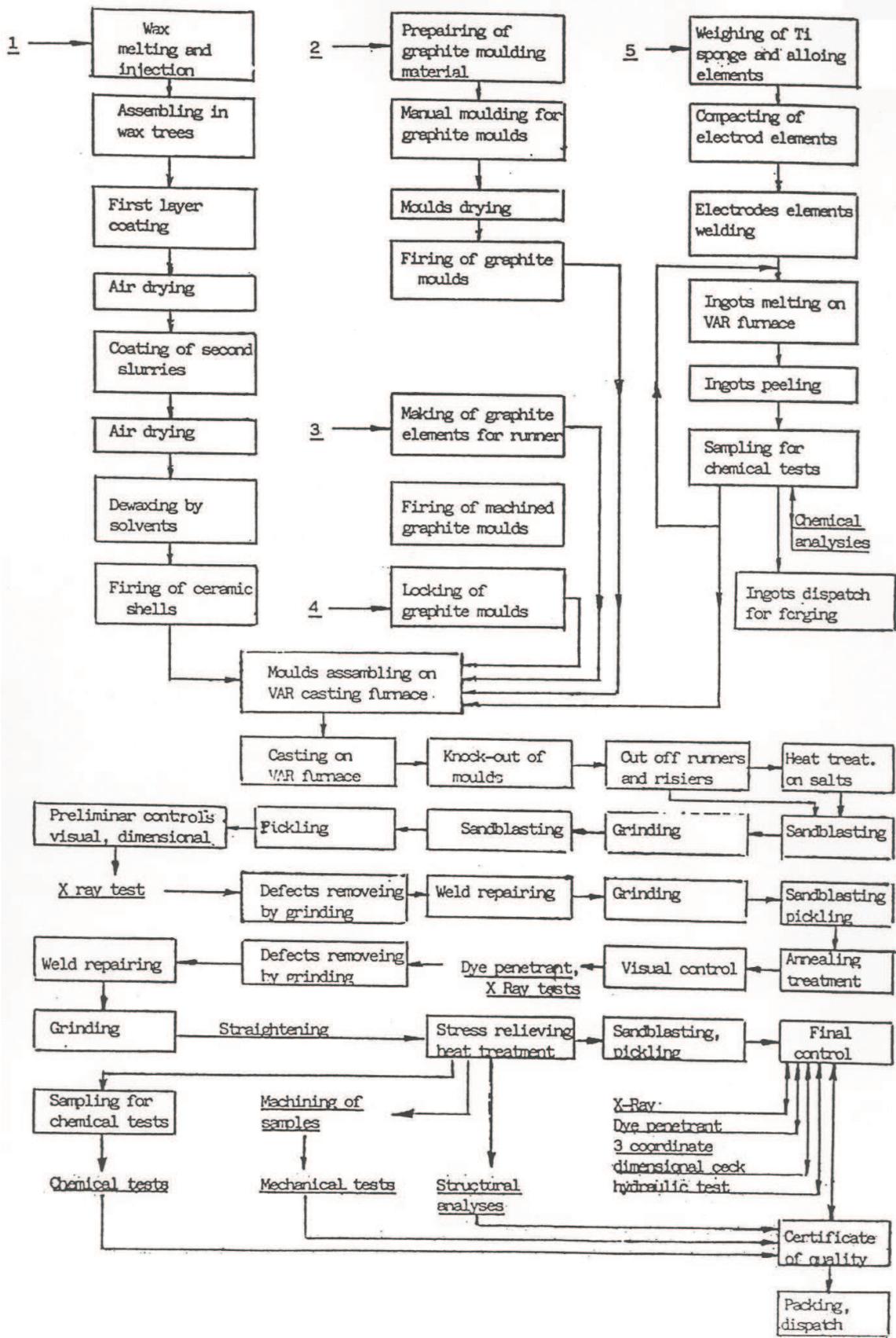
The achievement of this titanium foundry in Roumania offers a new European facility which is able to satisfy domestic and foreigners demands for different industries.

The technology which will be used, in the same time with all equipments, already verified in industrial practice, gives a guarantee for the quality of castings which will be produced in this foundry.

METAV S.A., following the economical opening policy of Roumania, is interested in cooperation with foreigners partners from Europe and from all over the world, in order to produce high quality castings at the lowest possible price.

The titanium alloy foundry of METAV S.A. is, starting from this moment, at disposal of foreigners customers, all orders and requirements being treated with all our attention and rapidity, all interested customers being welcomed in this foundry, as well as in all production capacities from METAV S.A.

THE TECHNOLOGICAL FLOW FROM TITANIUM FOUNDRY



## ESAMI PRELIMINARI SU STRUTTURA E CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN FORGIATO SPERIMENTALE IN LEGA Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr

F.Felli\*, P.Lingua\*\*, G.B.Festa\*, G.Cammarata\*.

(\*) - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali, delle Materie Prime e Metallurgia - Università "La Sapienza", Roma.

(\*\*) - GINATTA TORINO TITANIUM.

### Introduzione

E' stata prodotta a titolo sperimentale una lega del tipo Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (38.6.44) appartenente alla famiglia delle leghe  $\beta$  del titanio, e in particolare con struttura  $\beta$  metastabile.

Questa lega viene proposta per le ottime caratteristiche di forgiabilità, lavorabilità sia a caldo che a freddo, elevate caratteristiche meccaniche, buon comportamento a fatica e soprattutto eccellente resistenza a corrosione. La lega inoltre se prodotta secondo specifiche non aeronautiche diventa, anche grazie ad una riduzione di costi, appetibile in molte applicazioni industriali, per cui il suo mercato risulta notevolmente ampio (1,2).

In questo lavoro sono state studiate in particolare: la risposta

della lega ai trattamenti di invecchiamento e le relative strutture ottenute, le caratteristiche meccaniche in termini di  $\sigma_R$ -  $\sigma_{y0.2}$ -A%, e le velocità di propagazione della cricca ( $da/dN-\Delta k$ ) in relazione ai diversi trattamenti termici.

I risultati sono stati posti a confronto con quelli di una lega simile BETA-C prodotta dalla società RMI (USA), studiata accuratamente con le medesime procedure in precedenti lavori (3,4).

### **Materiali e Tecniche**

La lega è stata prodotta a partire da cristalli elettrolitici di Ti di produzione Ginatta e da leghe madri commerciali. E' stata effettuata una tripla fusione in un forno ad arco sotto vuoto (VAR Leybold 600).

Il lingotto così ottenuto è stato forgiato alla temperatura di 950°C ottenendo due piastre di dimensioni 600\*300\*30 mm circa. La piastra impiegata per la caratterizzazione è stata solubilizzata a 815°C per 1/2 ora, raffreddamento in aria.

La lega presenta la seguente composizione chimica:

3.5 Al; 6.45 V; 7.0 Cr; 2.9 Mo; 3.55 Zr, resto Ti.

Dal piastrone, tramite taglio alla fresatrice, sono stati ricavati i provini per le prove di invecchiamento, di trazione e di fatica.

Le prove di invecchiamento sono state condotte su provini di dimensioni 20\*15\*8 mm, protetti da un rivestimento di nitruro di boro, in un intervallo di temperatura 350°C-650°C per tempi fino a 375 h con rilevazione della durezza Vickers (carico 50 Kg, tempo di azione 15 secondi).

Le prove di trazione sono state eseguite in questa prima fase esclusivamente su provini solo solubilizzati ed invecchiati a 500°C-20h.

Le prove di fatica (ASTM E 647) sono state condotte in aria con frequenza di 10 Hz, R=0,5 su provini CT (compact tension specimen) di dimensioni B=12,5 mm e W=40 mm, nelle condizioni di campioni solubilizzati e invecchiati rispettivamente a 350°C-200h; 400°C-50h; 450°C-20h; 500°C-20h; 550°C-20h; 600°C-20h.

Gli esami metallografici e quelli delle superfici di frattura dei provini di fatica sono stati condotti mediante microscopia ottica e SEM-EDS.

## **Risultati e Discussione**

In fig.1 sono riportate le curve di invecchiamento ottenute alle varie temperature indicate. Le curve sono caratterizzate da un identico andamento qualitativo per quanto concerne l'incremento di durezza all'aumentare del tempo di trattamento.

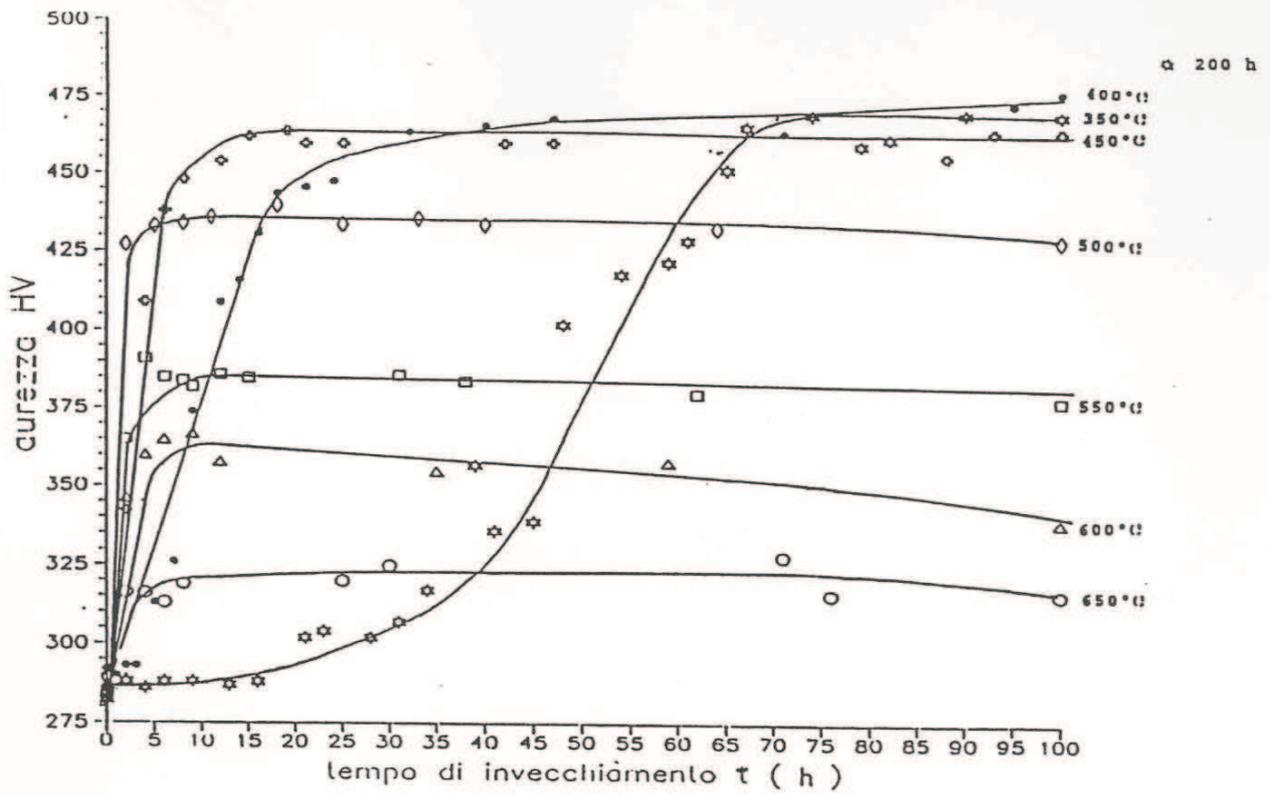


FIG.1: Curve d'invecchiamento per la lega in esame alle temperature indicate.

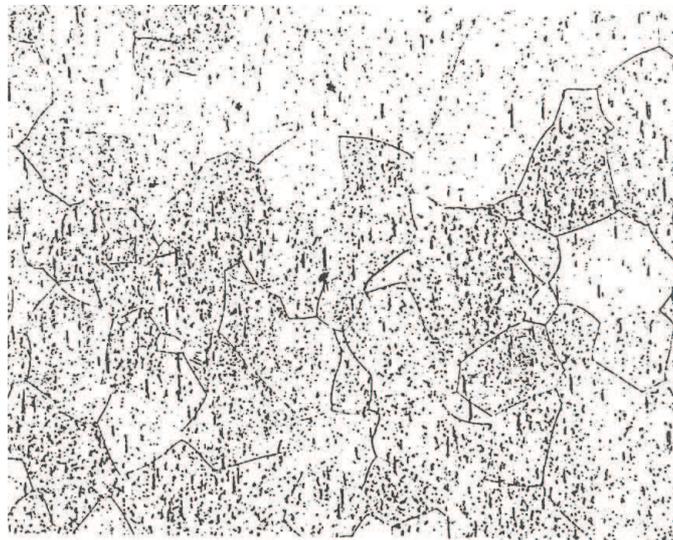


FIG.2: Micrografia ottica della lega solubilizzata (x50)

In particolare le curve denotano tempi di incubazione molto brevi con altrettanto rapido raggiungimento dei valori massimi di durezza, relativamente alle varie temperature. Questa lega presenta sostanziali incrementi di durezza anche a 650°C.

Le massime durezze si raggiungono alle temperature di 400°C e 350°C; in questo caso, come è ovvio, i tempi (anche di nucleazione) sono maggiori; particolarmente a 350°C, occorrono tempi di trattamento dell'ordine di 200 ore.

Per quanto riguarda le indagini metallografiche, per la lega solubilizzata (fig.2) si evidenzia una struttura tipica di un forgiato con taglia dei grani discretamente grossolana e disomogenea.

Con il trattamento di invecchiamento si riscontra una precipitazione di  $\alpha_s$  (fase scura) distribuita omogeneamente nella matrice  $\beta$  (fase chiara) sempre più fine al diminuire della temperatura (fig. 3).

Da notare come  $\alpha_s$  precipiti omogeneamente, anche se più grossolanamente, fino alla temperatura di 650°C.

Prove preliminari di determinazione delle caratteristiche tensili danno i seguenti valori:

campione solubilizzato,  $\sigma_{y0.2}$  828 MPa,  $\sigma_R$  844 MPa, 12.5 A%;

campione invecchiato 500°C (20h),  $\sigma_{y0.2}$  1382 MPa,  $\sigma_R$  1455 MPa, 2.2 A%.

E' verosimile pensare che il basso valore di allungamento ottenuto fra l'altro per un valore molto elevato della resistenza a

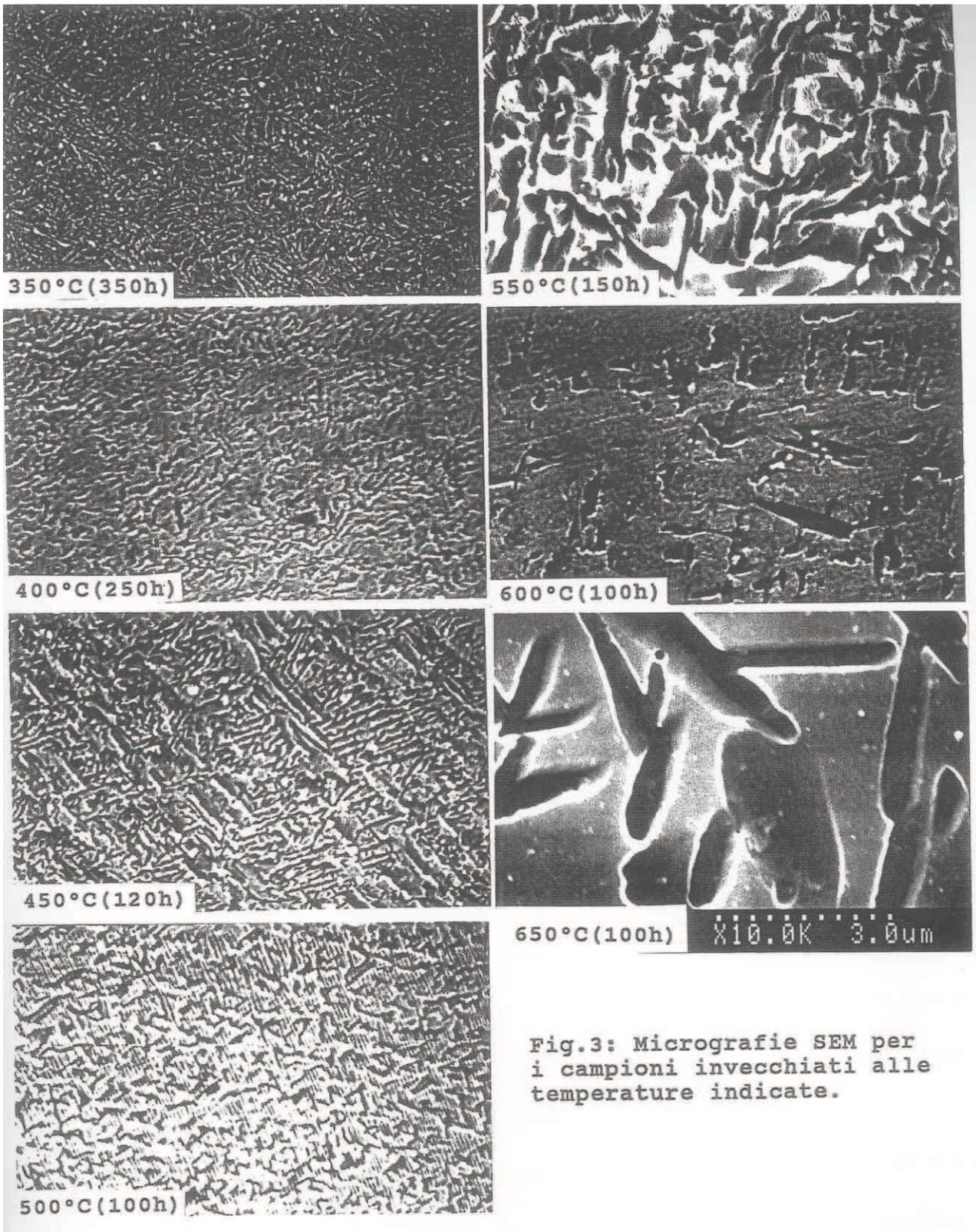


Fig.3: Micrografie SEM per i campioni invecchiati alle temperature indicate.

trazione, può notevolmente migliorare con i trattamenti termici eseguiti sopra i 500°C.

Nelle figg.4 e 5 sono riportati i risultati sperimentali delle prove di fatica eseguite sui campioni solubilizzati ed invecchiati alle temperature indicate.

In ambedue le figure vengono riportati i punti sperimentali del campione solubilizzato e quello invecchiato a 350°C per 200h che rappresentano gli estremi inferiore e superiore in termini di velocità di propagazione della cricca.

Tutti i campioni invecchiati presentano sempre velocità di propagazione della cricca maggiori rispetto al campione di lega solo solubilizzata, collocandosi all'interno dei due estremi su indicati.

L'esame SEM delle superfici di frattura (fig.6 e 7) mostra una morfologia influenzata dalla struttura del grano (effetto della forgiatura) che, tuttavia, nel solubilizzato è caratterizzata da una propagazione transgranulare con un aspetto a gradini (cleavage like-steps) sia ai bassi che agli alti valori di  $\Delta k$ ; in questa lega la frattura non assume un aspetto con le classiche striature di fatica, ma si mantiene fortemente rugosa.

I campioni invecchiati si differenziano per un aspetto caratterizzato da una frattura transgranulare con propagazione piana; i piani risultano mediamente paralleli al piano di frattura. Anche in questo caso la morfologia non si differenzia sia ai bassi che agli alti valori di  $\Delta k$ .

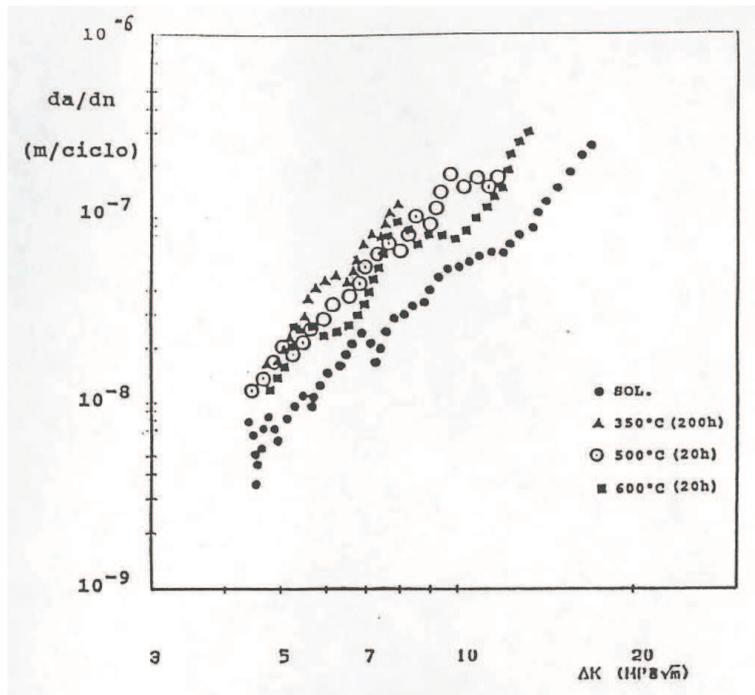


FIG.4: Risultati sperimentali delle prove di fatica per i campioni in esame invecchiati alle temperature indicate.

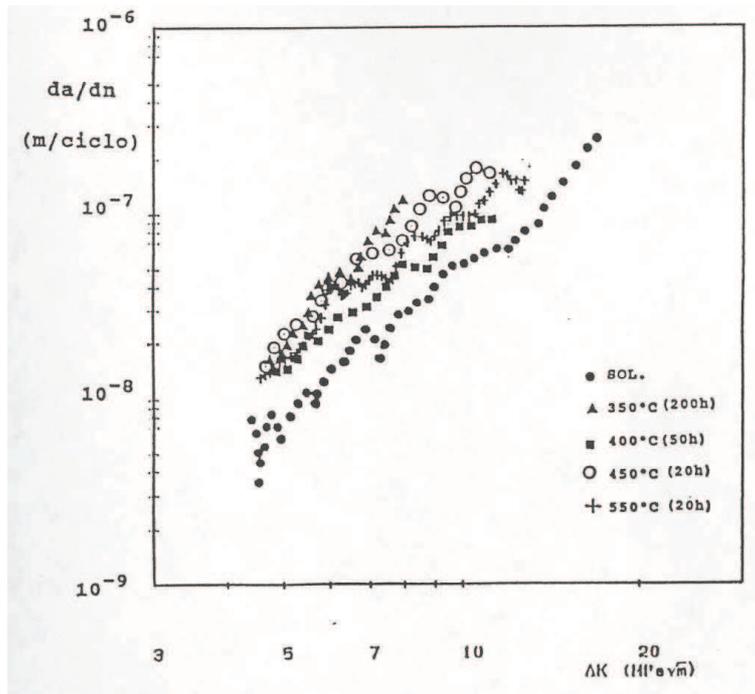


FIG.5: Risultati sperimentali delle prove di fatica per i campioni in esame invecchiati alle temperature indicate.

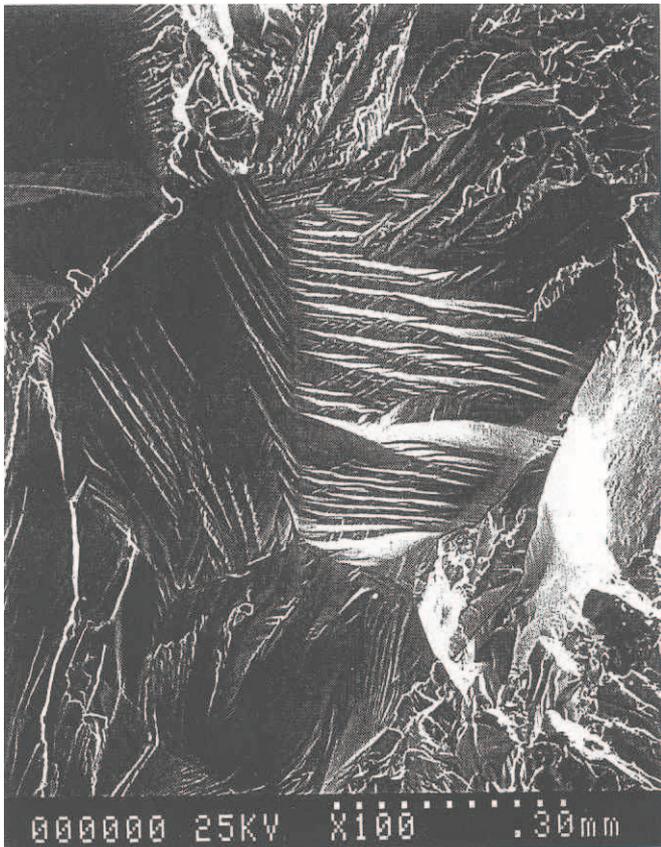


Fig.6: Micrografia SEM della

superficie di frattura di fatica dei campioni:

0) Solubilizzato, a 3mm dall'intaglio;

4) Solubilizzato, a 14mm dall'intaglio.

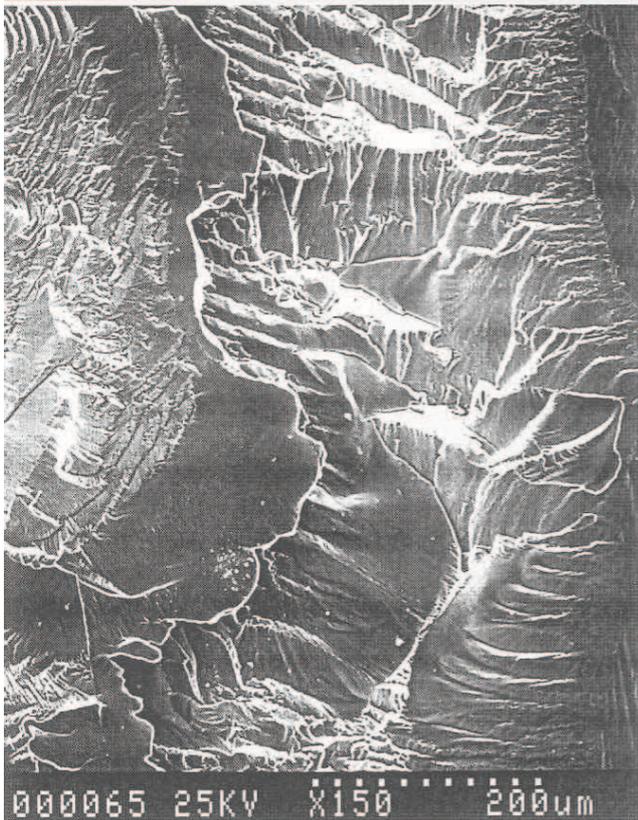
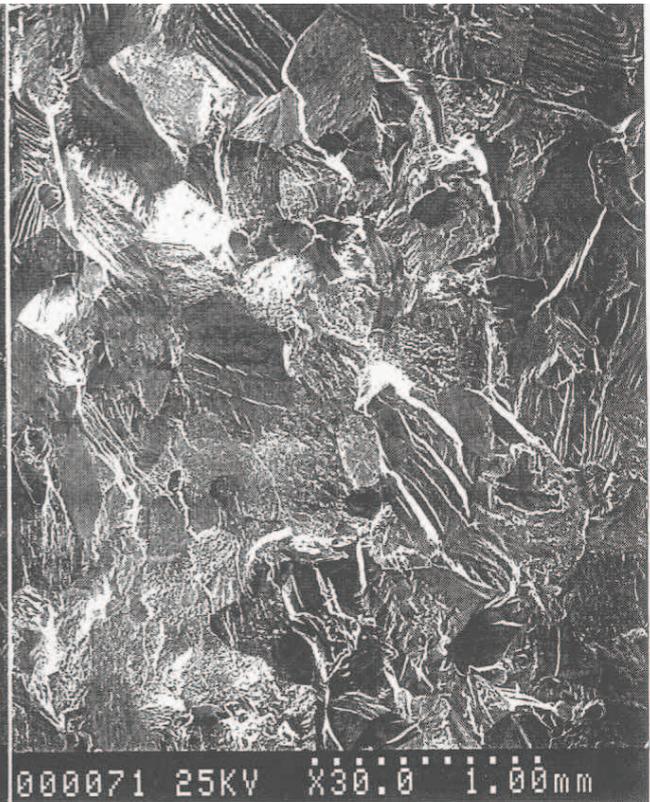


Fig.7: Micrografia SEM della superficie di frattura di fatica dei campioni:  
6) Invecchiato a 450°C, a 5mm dall'intaglio;  
71) Invecchiato a 400°C, a 9mm dall'intaglio;  
65) Invecchiato a 3mm dall'intaglio.

In fig.8 vengono infine riportate per confronto le fasce che individuano l'insieme dei dati sperimentali ricavati da tutte le prove di fatica eseguite per la lega del presente studio (piastra fucinata) e una lega simile BETA-C prodotta dalla società RMI (piastra laminata).

si osserva che in tutti i casi la piastra fucinata presenta velocità di propagazione della cricca sostanzialmente inferiori rispetto al laminato.

## **Conclusioni**

La lega prodotta risulta compositivamente omogenea con una struttura tipica di un forgiato e taglia dei grani relativamente disomogenea e grossolana.

La risposta ai trattamenti di invecchiamento è molto buona con tempi brevi di raggiungimento delle durezze massime in riferimento alle temperature di prova nel campo  $450^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$ .

Prove preliminari di determinazione delle caratteristiche tensili hanno dato valori estremamente interessanti.

Per quanto riguarda le prove di velocità di propagazione della cricca la piastra fucinata presenta valori sostanzialmente inferiori rispetto ad una lega simile BETA-C (piastra laminata) prodotta dalla società RMI.

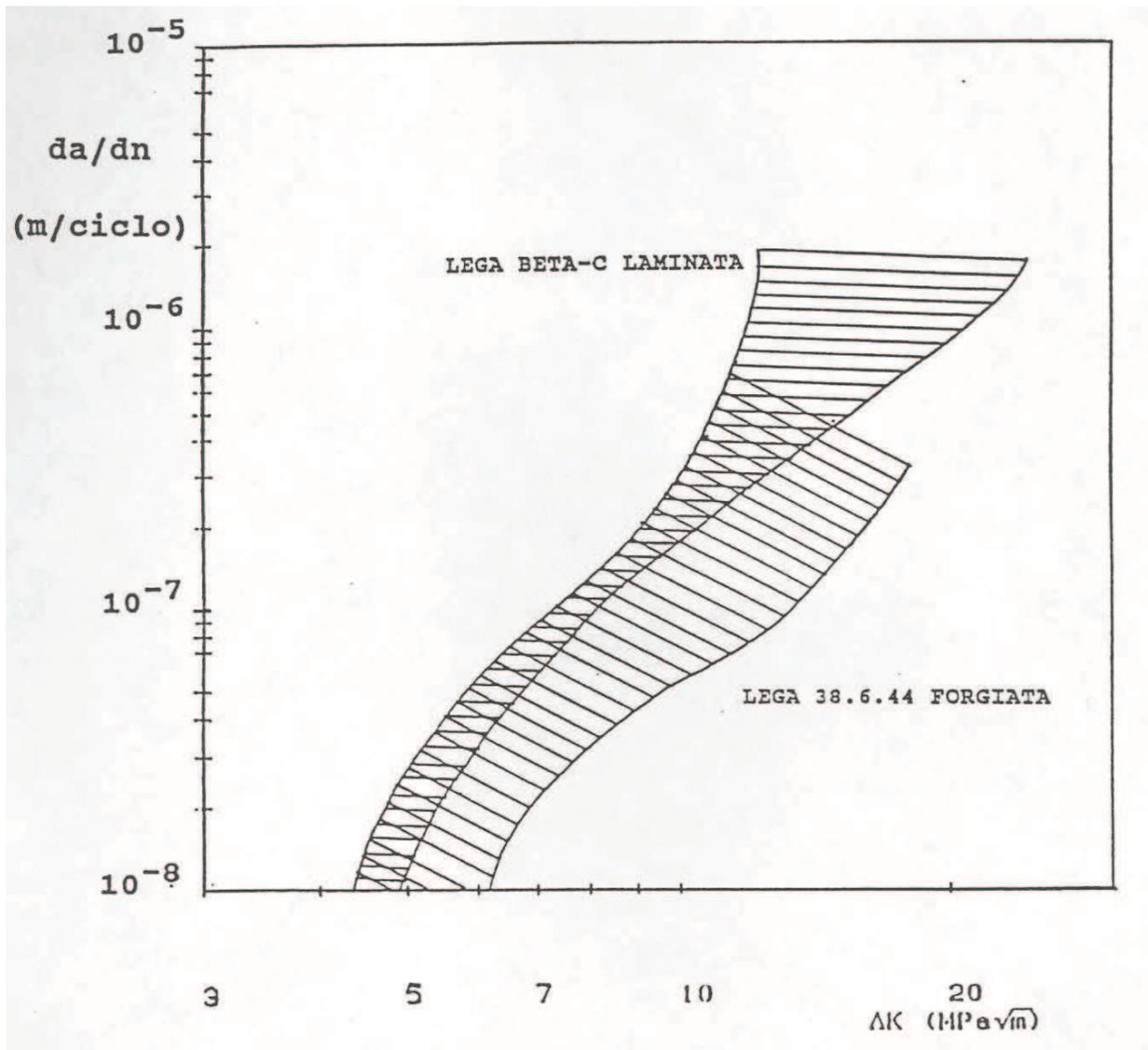


Fig.8: Confronto tra le fasce che individuano l'insieme dei dati sperimentali ricavati da tutte le prove di fatica eseguite per la lega BETA-C laminata e la lega 38.6.44 forgiata.

## Riferimenti bibliografici

- 1) - RMI-Titanium Technical Bulletin: "RMI 3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr Titanium Alloy for Deep Hardening Applications", January, (1969).
- 2) - D.E.Thomas, S.Ankem, W.D.Goodin, S.R.Seagle: "Beta-C: An Emerging Titanium Alloy for the Industrial Marketplace", in "Industrial Applications of Titanium and zirconium", (C.S.Young, J.C.Durham), (1986), pp.144-163.
- 3) - D.Buttinelli, F.Felli, G.B.Festa, P.Lingua "Comportamento meccanico di una lega BETA-C commerciale" VI Meeting Internazionale sul Titanio GTT, Torino 23 novembre 1990, pp.14.1 -14.20.
- 4) - D.Buttinelli, F.Felli, G.B.Festa "Evaluation of the Mechanical Behaviour of a Beta-C Titanium Alloy in Aged and Overaged Condition", Metallurgical Science and Technology, vol.9, n.3, 1991.

# ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS MECHANISM $TiB_2$ MELT FROM HALOGEN COMPOUND.

I.V. ZARUTSKY, V.I. SHAPOVAL, S.V. VOLKOV

ACADEMY OF SCIENCE OF UKRAINE

INSTITUTE OF GENERAL AND INORGANIC CHEMISTRY,  
KIEV

The possibility of titanium diboride electrochemical extraction from the melt, containing compounds of trivalency titanium and boron is known for a long time. We want to pay attention to separate peculiarities of this process. The finding out the peculiarities permit to understand the role of electrolyte composition in volume mechanism or electrochemical active particles formation. It is possible these particles directly take part in the charge transport reaction.

In Fig.1 the voltamperical dependences at individual and joint reaction compounds of titanium and boron from chloride-fluoride melt are given. Individual reduction is determined by equilibriums (1a), (1b), (2b) in the melt volume, charge transport delay stages (1c) and (2c) for titanium and boron accordingly. The typical features of the joint reduction process are:

a) The availability of one wave at more positive potentials then for separate components,

b) The absolute absence of polarization with exception of concentration polarization at current peak meaning achievement,

c) The accordance of synthesis limiting current to the sum of separate components limiting currents.

The indicated features permit to suppose the process of synthesis is determined in the main by the individual components diffusion and thermodynamics of titanium and boron interaction with a large gain of energy. However, more detailed research shows the point “c” is not observed in the wide interval of polarization rate. Fig.2.3. The polarization rate is greater the meaning of synthesis peak current, as compared with the individual processes, current sums is smaller. So there is no summed diffusion flows and separate reduction processes. There is enough slow chemical interaction of titanium and boron compounds in the melt with formation of electroactive particle. This particle has the phenomenal properties as it can receive nine electrons with the titanium diboride formation. Its properties is too well shown from the researches with the help of cyclic voltamperometry.

In Fig.4 voltamperical diagrams of titanium diboride synthesis taken off at the absence of fluorine too and at its addition are shown.

At the absence of potassium fluoride in the melt the cathode wave is considerably stretched on the potential: peak potential is shifted in the negative region as compared with the titanium diboride potential equilibrium and extraction potential. It is observed strong polarization at the anodic wave too. So, cyclic voltamperogram reflects phenomenon of autoinhibition.

The phenomenon is possible in the only case, when fluorine ions are released at electrolytic reduction of electrochemically active particle with titanium diboride formation. These ions lead to formation

of the new electrochemically unactive complex at the electrode surface.

Potassium fluoride ions addition in the melt leads to titanium diboride extraction potential shifting to the negative region and to polarization reduction for cathode wave as well as for anode one.

Observed phenomena permit to suppose:

a) At the absence of fluorine ions in electrolyte volume the reaction type (3a) with the formation of electrochemically active particle of  $\text{TiB}_2\text{F}_8\text{Cl}_4^{3-}$  takes place,

b) At its electroreduction according to the reaction (3c) fluorine ions are released, which inhibit the cathode process. New coordinate compounds are formed (reaction 3b),

c) Potassium fluoride addition to the melt leads to the reactions (3b) in the whole electrolyte volume.

Calculation of ligands quantity (fluorine ions) according to the extraction potential shifting (fig.5) gave the meaning  $N=4$ , that corresponds to equilibrium (3b). Calculation of electrons quantity according to Nicolson-Shane Theory for the reversible processes gave the meaning "9" for reaction (3c).

There is all grounds to suppose the formation of complex coordinate particle of  $\text{TiB}_2\text{F}_8\text{Cl}_4^{3-}$  type, which is electrochemically active one. It is necessary to find out its quantitative composition.