

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

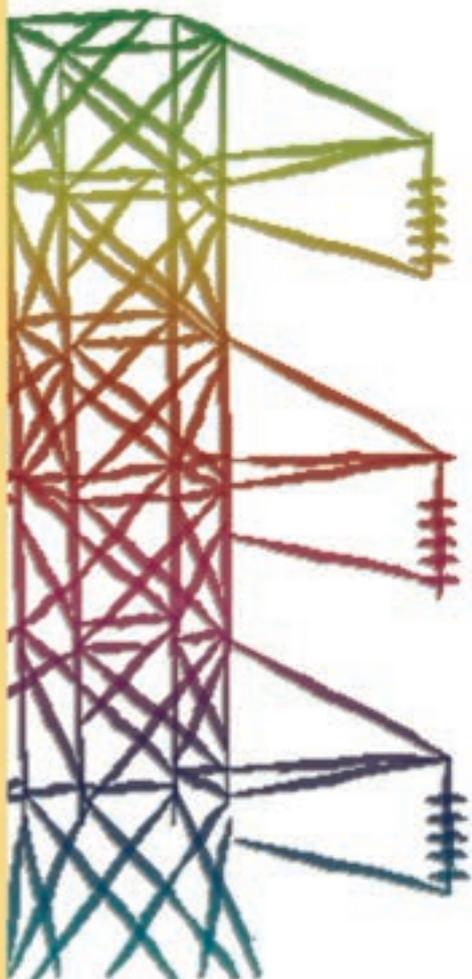


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione girante pompa e test in piombo

Marco Utili, Silvia De Grandis





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione girante pompa e test in piombo

Marco Utili, Silvia De Grandis

REALIZZAZIONE GIRANTE POMPA E TEST IN PIOMBO

Marco Utili, Silvia De Grandis (ENEA)

Febbraio 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

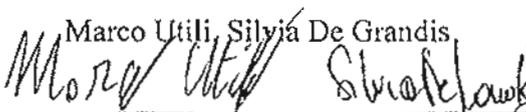
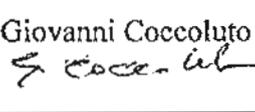
ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 1 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Titolo: Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo

Autore: M. Utili, S. De Grandis,

Contributi: M. Agostini, M. Muzzarelli

Sommario: Il composto ternario Ti_3SiC_2 è stato selezionato come uno dei materiali candidati per la realizzazione del prototipo di una girante per una pompa meccanica da utilizzarsi in ambiente piombo. Per eseguire una prima verifica sperimentale del comportamento a corrosione del Ti_3SiC_2 in ambiente piombo è stata condotta una campagna sperimentale esponendo tre campioni del materiale in piombo fluente a $500^\circ C$. I risultati hanno confermato il comportamento inerte del composto ternario in suddette condizioni e non hanno mostrato penetrazioni del metallo liquido nella matrice. Infine, ai fini di verificare la lavorabilità mediante macchina utensile del materiale in esame, è stata realizzata una girante interamente in Ti_3SiC_2 .

REPORT Accordo di Programma - Linea progettuale 3: Reattori innovativi di quarta generazione – Generation IV			
	Autori	Convalida	Approvazione
	Marco Utili, Silvia De Grandis 	Luigi Moreschi 	Giovanni Coccoluto 

 Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 2 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Indice

1) Introduzione.....	3
2) Scelta del materiale	4
3) Test preliminare in piombo	7
4) Analisi dei risultati	9
5) Realizzazione della Girante.....	12
Conclusioni.....	17
Bibliografia.....	19

 Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 3 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

1) Introduzione

Il Lead cooled Fast Reactor (LFR) è un reattore a spettro neutronico veloce che impiega come refrigerante piombo o sue leghe. Presenta un ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell'uranio fertile e gestione degli attinidi minori.

Questa tipologia di reattori è stata individuata dal *Generation IV International Forum* (GIF), nel dicembre del 2002 all'interno della *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, come una delle sei tipologie di reattori che possono soddisfare tutte le caratteristiche dei sistemi definiti di quarta generazione.

Una delle possibili configurazioni di LFR presenta un circuito primario di tipo a piscina con circolazione forzata del fluido refrigerante realizzata mediante un sistema di pompaggio meccanico. Le pompe meccaniche, individuate in una progettazione preliminare, sono ad asse verticale con girante immersa di tipo aperto. La girante si trova ad operare in un ambiente particolarmente ostile: piombo fluente con velocità relativa dell'ordine di 10m/s alla temperatura di 500°C circa. Il corpo pompa è quindi soggetto a fenomeni di corrosione/erosione combinati.

Si è perciò reso necessario avviare un programma atto all'individuazione di una tipologia di materiale che presenti, in suddette condizioni, un'elevata resistenza a corrosione/erosione. Sulla base delle informazioni disponibili in letteratura si è individuato un materiale che sembra soddisfa le condizioni suddette e, per avvalorarne il comportamento, sono stati effettuati test preliminari in piombo fluente. Infine, per verificare la lavorabilità del materiale mediante macchina utensile, si è proceduto alla realizzazione di una girante con opportuna geometria.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 4 of 19
		HIS-A-R-018	Rev: 0	

2) Scelta del materiale

I requisiti cui deve sottostare il materiale candidato per la realizzazione della girante della pompa sono i seguenti:

- ridotto rateo di corrosione in piombo a temperature superiori a 400°C, con una concentrazione di ossigeno compresa tra 10^{-5} e 10^{-7} wt%;
- bassa solubilità in piombo alle condizioni operative sopraindicate;
- ridotto fenomeni di infragilimento alle alte temperature con presenza di carichi termici e meccanici elevati;
- buon comportamento meccanico compresa un'elevata resistenza a fatica Hertziana alle condizioni operative indicate;
- elevata resistenza a shock termici;
- facile lavorabilità;

Il materiale selezionato è il Ti_3SiC_2 , una lega ternaria appartenente alla famiglia $M_{n+1}AX_n$ (o MAX-phase), che può essere considerata come un composito nano-laminare con una microstruttura costituita da layers con strati monoatomici di Silicio intervallati con layers di Ti_3 e C_2 , vedasi Fig.1. I materiali facenti parte della MAX-phase presentano un'elevata stabilità alle alte temperature, un comportamento refrattario [2], [3] e, grazie alla struttura laminare, un comportamento pseudo-plastico a temperatura ambiente: recentemente si è osservato che campioni di Ti_3SiC_2 possono essere caricati ciclicamente a compressione a temperatura ambiente con tensioni fino a 1GPa, recuperando completamente con la rimozione del carico [4]. Ciò conferisce al Ti_3SiC_2 una combinazioni di proprietà che non si riscontrano in altri materiali.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 5 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

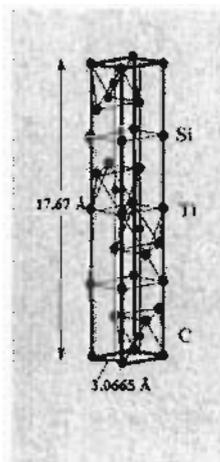


Fig. 1 Struttura cristallina del Ti_3SiC_2 [5].

Infatti, il composto ternario Ti_3SiC_2 combina alcune proprietà dei materiali metallici con quelle dei materiali ceramici, quali [5]:

- Buona lavorabilità mediante macchina utensile;
- Buona conducibilità elettrica e termica;
- Resistente a shock Termici;
- Deformabilità plastica ad elevate temperature;
- Tenacità;
- Buona Resistente alla fatica;
- Resistente all'ossidazione (può essere impiegato in aria fino a 1400 °C);
- Può essere depositato mediante Plasma Spray o Chemical Vapor Deposition su materiali metalli al fine di realizzare un coating protettivo;
- Facile da modellare mediante l'impiego di molteplici tecniche quali: pressa a freddo, slip casting, estrusione, sinterizzazione (densità 100%) e injection molding.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 6 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Le caratteristiche del Ti_3SiC_2 sono ben note essendo la fase maggiormente investigata in letteratura all'interno della famiglia delle MAX-phase. Le principali caratteristiche elettriche, termiche e meccaniche della lega ternaria sono riportate in Tab. 1. Da queste si può immediatamente dedurre come il Ti_3SiC_2 costituisca un ottimo materiale per l'impiego in ingegneria alle alte temperature grazie a: temperatura massima di servizio in aria di 900–1000°C (in vuoto o in atmosfera inerte può essere impiegato fino a 1600°C), un'elevata resistenza alla corrosione sia in ambiente alcalino che acido, un coefficiente di espansione termica basso abbinato a un'elevata resistenza a shock termici.

Physical and Electrical	
Density, gm/cm ³	4 - 5
Electrical Conductivity at RT, ohm ⁻¹ m ⁻¹	2 - 4.5 x 10 ⁶
Thermal Properties	
CTE, °C ⁻¹	8 - 12 x 10 ⁻⁶
Thermal Conductivity at RT, W/m.k	30 - 45
Thermal Conductivity at °C 1200, W/m.k	25 - 35
Service Temperature, Air, °C	1000 - 1400
Service Temperature, Inert or Vacuum, °C	1400 - 1800
Mechanical Properties	
Elastic Modulus, GPa	270 - 320
Hardness, Vickers	400 - 600
Tensile Strength at RT, MPa (brittle)	100 - 200
Tensile Strength at , MPa (ductile)	20 - 40
Flexure Strength at RT, MPa (brittle)	250 - 400
Flexure Strength at , MPa (ductile)	50 - 100
Compressive Strength at RT, MPa (brittle)	700 - 1100
Compressive Strength at , MPa (ductile)	200 - 500
Fracture Toughness, K _{IC} , MPa √m.	6 - 9
Thermal Shock, ΔT _C (100 μm grain size)	1200 - 1400 °C
Thermal Shock, ΔT _C (5 μm grain size)	500 - 700 °C

Tab. 1 Principali proprietà del Ti_3SiC_2 [6].

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 7 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Il Ti_3SiC_2 contiene e confina la propagazione dei cricche attraverso il materiale a piccole aree, prevenendone e limitandone i danni. Le cause di questo particolare comportamento si possono trovare nella sua struttura laminare derivante dalla metodologia di fabbricazione. Va infine menzionato come i processi di realizzazione per estrusione, cold isostatic pressing (CIPing), uniaxial pressing e slip casting, seguiti da densificazione e combinati con lavorazioni a utensile, del materiale permettono di realizzare geometrie complesse con costi contenuti.

3) Test preliminare in piombo

Ai fini di eseguire una prima verifica del comportamento a corrosione del materiale selezionato in presenza di piombo fluente è stata eseguita una campagna sperimentale di corrosione su dei provini in Ti_3SiC_2 all'interno dell'impianto sperimentale CHEOPE III [7], Fig. 2, presso il centro ricerche ENEA Brasimone.

Tre provini di geometria cilindrica sono stati inseriti all'interno della sezione di prova di CHEOPE III, Fig. 3, mentre su un quarto provino è stata eseguita un'analisi della composizione mediante microscopia elettronica EDAX. La sezione di prova dell'impianto è costituita da tre setti disposti verticalmente uno sopra l'altro, ciascun setto può contenere fino a 9 campioni inseriti all'interno di 3 canotti in AISI 316 disposti a disposti a 120° l'uno dall'altro all'interno del setto, come visibile in Fig. 3. I tre campioni in Ti_3SiC_2 sono stati inseriti all'interno di uno dei tre tubi. I provini sono fissati all'estremità mediante opportuni pins. La temperatura all'interno della sezione di prova è controllata mediante due termocoppie poste all'inizio e alla fine della sezione medesima, mentre la misura della concentrazione di ossigeno è stata eseguita grazie ad una sonda (realizzata in Russia

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 8 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

all'IPPE, Obnisk) posta nella parte superiore della sezione di prova. I tre provini prima di essere inseriti nella sezione di prova sono stati lavati con CH₃COOH.

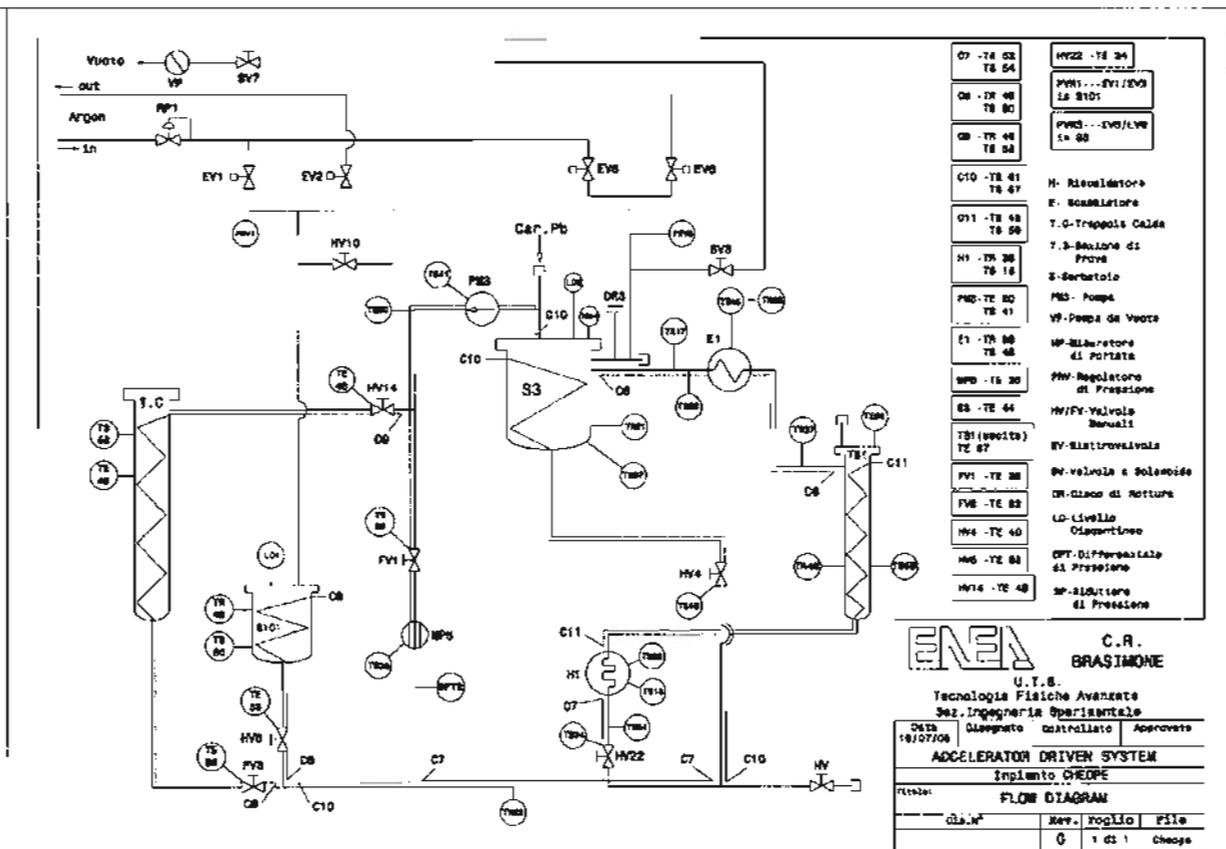


Fig. 2 P&I della facility CHIEOPE III [7].

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 9 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

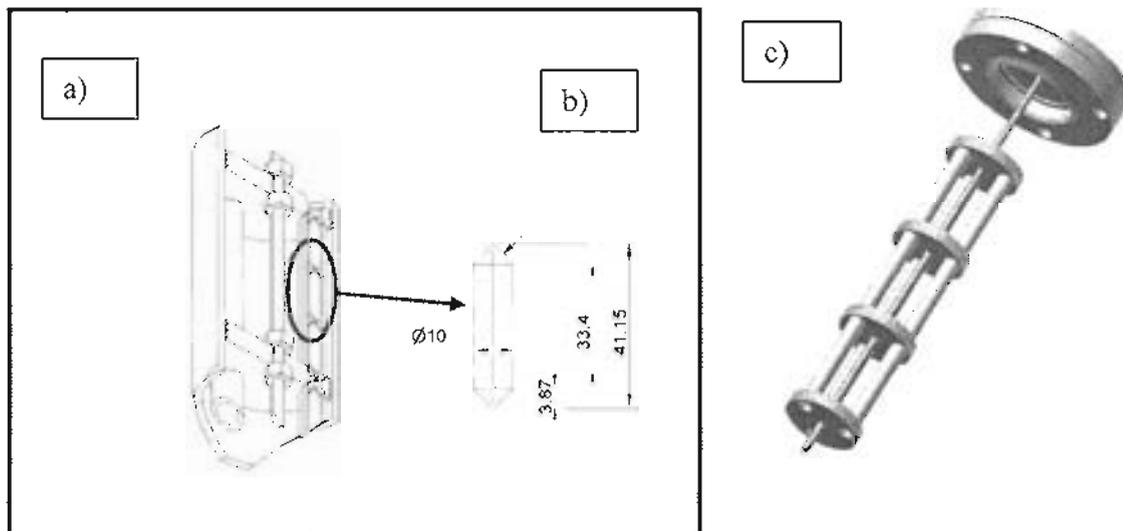


Fig. 3 a) Disegno della sezione di prova della facility CHEOPE III, b) disegno di uno dei campioni cilindrici in Ti_3SiC_2 (le misure sono espresse in mm), c) disegno d'insieme della sezione di prova:

I tre provini sono stati esposti a piombo fluente per 2.000h alle condizioni operative:

- Velocità del piombo: 1m/s circa
- Temperatura: 500°C
- Concentrazione dell'ossigeno: 10^{-6} wt%

Sui provini estratti è stata eseguita un'analisi della composizione mediante EDAX ed un'analisi della microstruttura mediante SEM.

4) Analisi dei risultati

Mediante l'analisi al SEM dei provini in Ti_3SiC_2 (PM 08607, PM08907 e PM09207) esposti a piombo fluente a 500°C è possibile osservare, Fig. 4, come il Pb non sia penetrato all'interno della

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO	DOCUMENTO	DATA EMISSIONE:	PAGINA
	Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	adP ENEA-MSE LP3 (C)	19/02/09	
		HS-A-R-018	Rev: 0	10 of 19

matrice del materiale. La presenza del Pb è riscontrabile solo nelle porosità aperte superficiali, aventi dimensioni dell'ordine del micron, mentre all'interno della matrice non si riscontra penetrazioni del metallo liquido, Fig. 5.

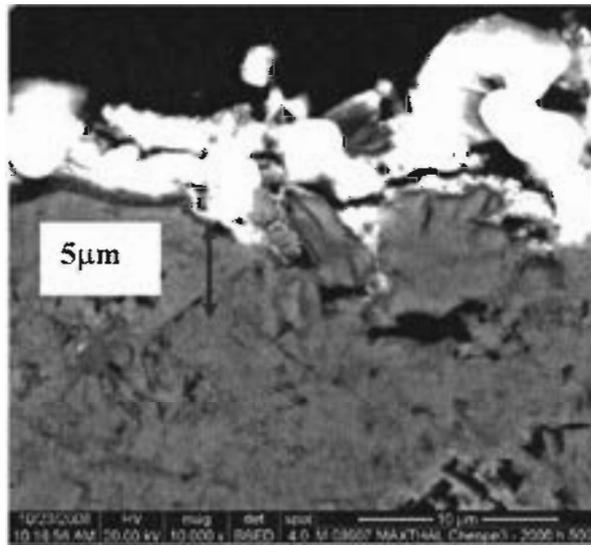


Fig. 4 Micrografia mediante SEM del provino PM08907 in Ti_3SiC_2 esposto per 2000h in piombo fluente a 500°C. ingrandimento 10micron.

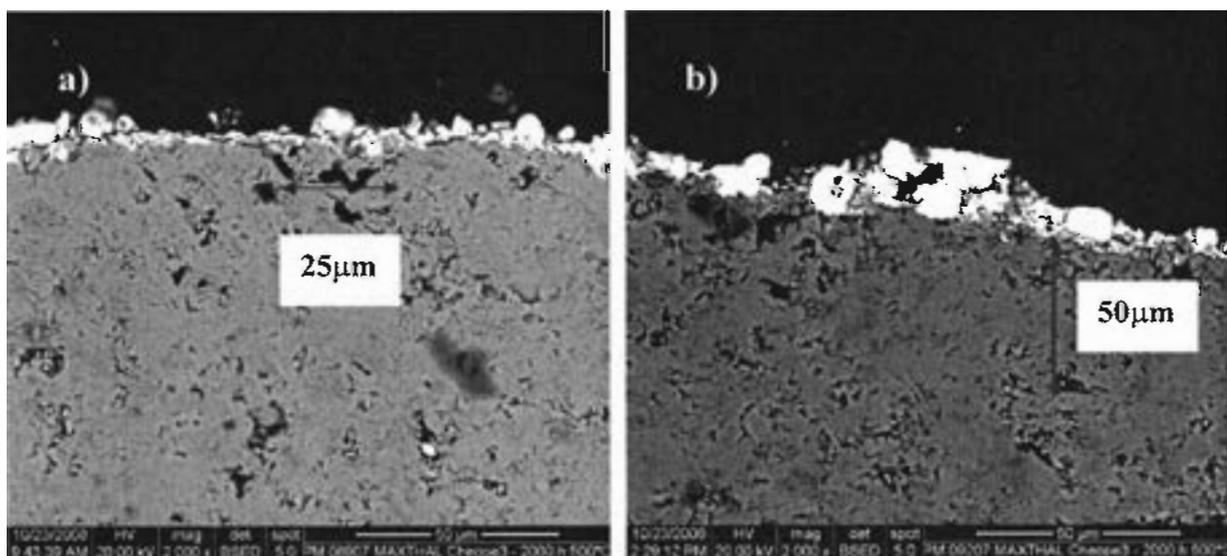
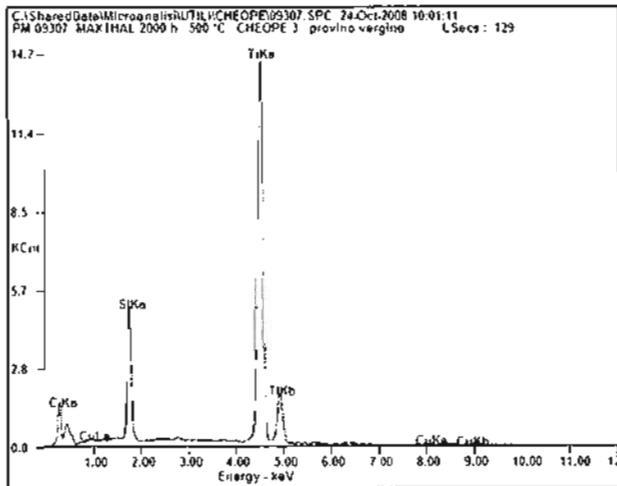


Fig. 5 Micrografia mediante SEM del provini PM 8907 e PM09207 in Ti_3SiC_2 esposto per 2000h in piombo fluente a 500°C, ingrandimento 50 micron. a) si osserva come le dimensioni delle porosità variano da qualche micron a 20-30 micron. b) non si riscontra tracce di Pb all'interno del provino.

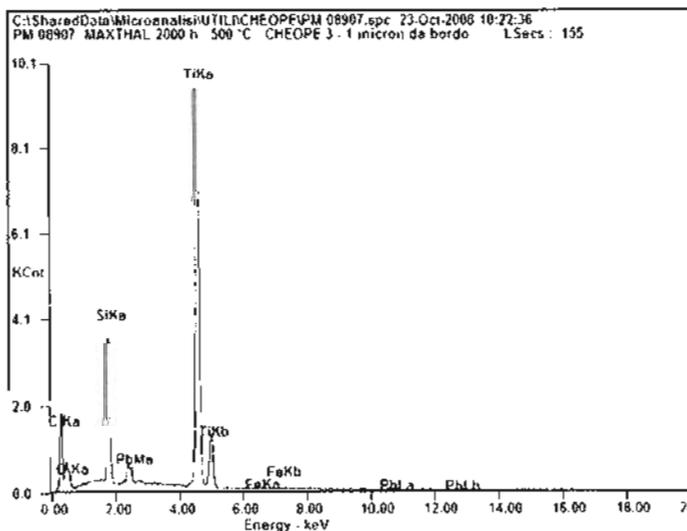
ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 11 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Dall'analisi della composizione mediante EDAX, del provino vergine, Fig. 6, e di quelli esposti a piombo fluente alle condizioni operative indicate, Fig. 7, è possibile osservare come il Ti_3SiC_2 sia completamente inerte, non si riscontrano formazioni di ossidi superficiali e le tracce di piombo sono in misura trascurabili, come è possibile riscontrare anche tramite le micrografie illustrate in Fig. 8.



Element	Wt %	At %
<i>C K</i>	22.9	52.0
<i>Si K</i>	10.4	10.1
<i>Ti K</i>	65.9	37.5
<i>Cu K</i>	00.6	00.2

Fig. 6 Analisi della composizione mediante EDAX del provino vergine in Ti_3SiC_2 .



Element	Wt %	At %
<i>C K</i>	27.6	55.4
<i>O K</i>	06.6	09.9
<i>Si K</i>	09.1	07.8
<i>Ti K</i>	51.6	26.0
<i>Fe K</i>	00.2	00.1
<i>Pb L</i>	04.6	00.5

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 12 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Fig. 7 Analisi della composizione mediante EDAX ad un micron di distanza dal bordo del provino in Ti_3SiC_2 esposto per 2000h in piombo fluente a 500°C.

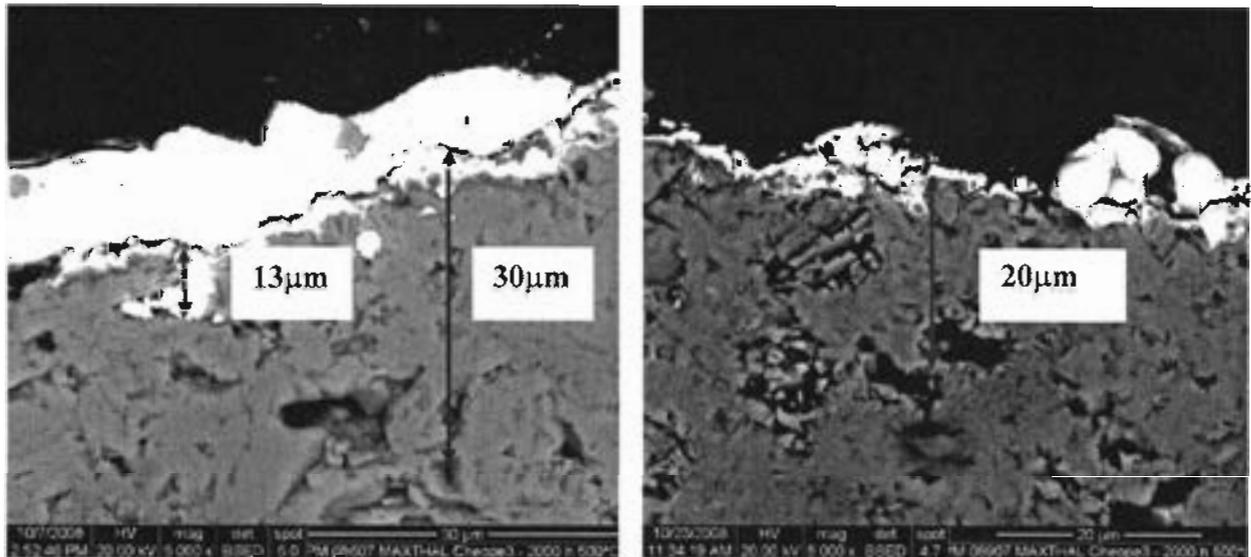


Fig. 8 Micrografia mediante SEM del provino PM08607 e 08907 esposto per 2000h in piombo fluente a 500°C.

Non si riscontrano inoltre fenomeni di erosione da parte del piombo nei confronti del materiale candidato.

5) Realizzazione della Girante

I test condotti sul composto ternario hanno mostrato, in via preliminare, la fattibilità del suo impiego come materiale per la realizzazione della girante di pompe meccaniche funzionanti in piombo.

Ulteriori test saranno necessari per confermare questi primi risultati, tuttavia prima di procedere con campagne sperimentali di lungo periodo si è ritenuto opportuno verificare un secondo parametro fondamentale ai fini della realizzazione della girante, la lavorabilità mediante macchinario utensile

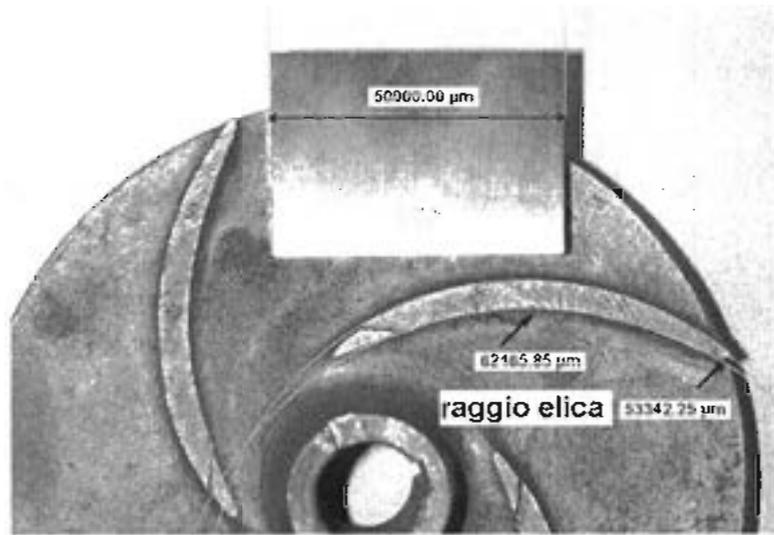
ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 13 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

del materiale. Infatti, è necessario che il materiale selezionato sia facilmente lavorabile con macchinario a 5 assi, e/o per elettroerosione per riuscire a realizzare geometrie complesse, dato che i problemi nella realizzazione meccanica di un manufatto sono molteplici, a partire dalla sua disposizione in macchina e fissaggio alla produzione del manufatto finito. Tale verifica è possibile solamente eseguendo una girante interamente in Ti_3SiC_2 partendo da un blocco di materiale grezzo. Si è quindi deciso di realizzare una girante in Ti_3SiC_2 con geometria basata sulla geometria delle giranti per le pompe meccaniche per la circolazione delle leghe di piombo e del piombo puro all'interno degli apparati sperimentali presenti nel centro di ricerca ENEA Brasimone. La geometria della girante selezionata si dovrà attenere in maggior misura al progetto preliminare della girante da impiegare nella configurazione presa in considerazione del Lead cooled Fast Reactor.

La tipologia di girante indicata per la pompa ad asse verticale del reattore LFR è una girante aperta, sono state pertanto analizzate due tipologie di giranti aperte, designate come VI 100 e VII40.

La prima è una girante realizzabile per lavorazione meccanica con macchinario a 5 assi CNC impiegata nelle pompe con prevalenza massima di 2,9bar e la seconda è una girante realizzabile per fusione o mediante lavorazione meccanica con macchinario a 5 assi CNC per pompe con prevalenza massima di 5bar. Mediante metrologia delle due giranti, vedasi Fig. 9, sono stati realizzati i relativi disegni con CAD, vedasi Fig. 10 e 11.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 14 of 19
		HIS-A-R-018	Rev: 0	



PM 00208 - GIRANTE VI 140

Fig. 9 Metrologia della girante VI140.

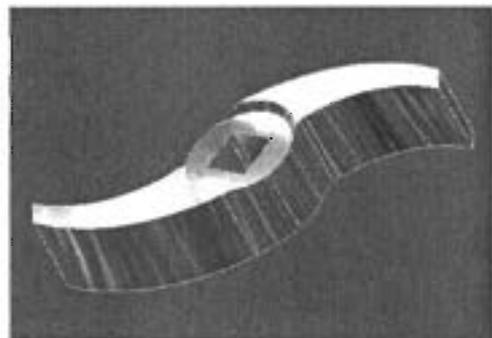
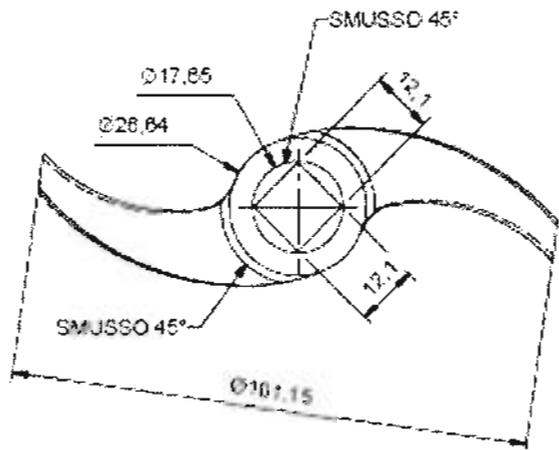


Fig. 10 Disegno mediante CAD della girante VI100.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 15 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

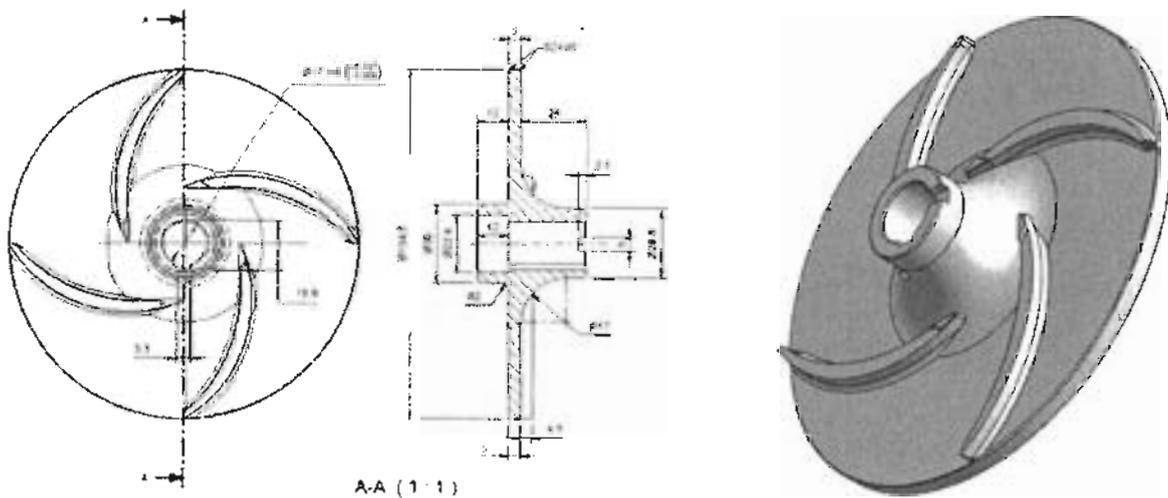


Fig. 11 Disegno mediante CAD della girante VII40.

Tra le due tipologie la girante che presenta una geometria più attinente a quella della pompa del reattore è la VII100.

La lavorazione è stata eseguita mediante macchinario 3 assi CNC e mediante elettroerosione per la realizzazione dello squadro interno di fissaggio dell'albero. La lavorazione del blocco di materiale non ha presentato particolari problemi anche per le superficie alettate le quali presentando un grado di rugosità superficiale pari a 0,6Ra hanno richiesto un'ulteriore lavorazione. Mentre la lavorazione per elettroerosione è stata possibile grazie alle buone proprietà di conduttore del materiale. Quest'ultima tipologia di lavorazione consente di realizzare anche sulle superfici più complesse gradi di finitura superficiale dell'ordine delle decine di micron. Il blocco di materiale è stato fornito dalla ditta americana, 3one2. Il manufatto finito è visibile in Fig. 12.

ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 16 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

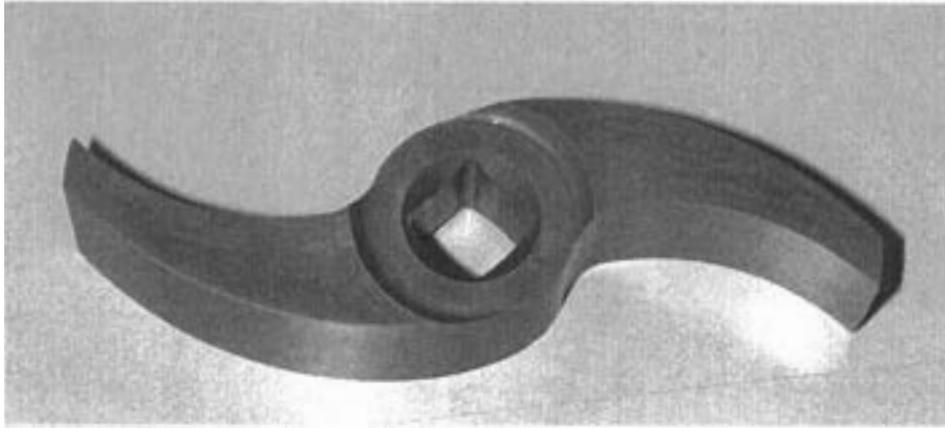


Fig. 12 foto della girante V1100 interamente realizzata in Ti_3SiC_2

La girante realizzata potrà essere impiegata in futuri test per valutare il comportamento ad erosione/corrosione del Ti_3SiC_2 in piombo, poiché un'analisi sperimentale affidabile può essere condotta, in via definitiva, solamente impiegando come campione la girante medesima inserita all'interno del suo opportuno corpo pompa. Solo in dette condizioni è possibile ricreare sia la velocità relativa massima tra il piombo ed il materiale di riferimento prossima alla velocità relativa massima presente tra le pale della girante ed il metallo liquido, sia le altre componenti del triangolo della velocità ricreando le condizioni reali in cui si troverà ad operare la girante.

Il Ti_3SiC_2 può essere anche impiegato per realizzare un ricoprimento superficiale di una girante in AISI 316. Questa ultima opzione introdurrebbe tuttavia ulteriori problemi per quanto riguarda la tecnologia di deposizione: qualità, affidabilità e ripetitività della deposizione su una geometria complessa quale è quella delle girante, richiedendo ulteriori analisi di ripetitività del prodotto ottenuto.

 Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 17 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Conclusioni

I risultati sperimentali della prova di corrosione in piombo fluente a 500°C in atmosfera passivante con una concentrazione di ossigeno di 10⁻⁶%wt hanno mostrato che il composto ternario Ti₃SiC₂, appartenente alla MAX-phase, presenta un comportamento completamente inerte nei confronti del piombo puro. Non si sono riscontrate né formazioni di ossidi superficiali né dissoluzione del materiale nel metallo liquido. Inoltre, l'assenza di tracce di piombo all'interno del composto ternario ha mostrato come il piombo non penetri attraverso le porosità aperte del Ti₃SiC₂, realizzato mediante processo di sinterizzazione. Il materiale risponde alle caratteristiche indicate in letteratura per quanto riguarda il suo comportamento come ceramico, materiale inerte e non ossidante. Per quanto riguarda il suo comportamento come metallo, ai fini di verificarne la lavorabilità, si è proceduto alla realizzazione di un manufatto avente peculiarità geometriche simili a quella indicate per la girante della pompa di una possibile configurazione di reattori refrigerati con leghe di piombo. La girante è stata realizzata sulla base delle giranti aperte impiegati nei circuiti a metallo liquido presenti presso il centro di ricerca ENEA Brasimone. La tipologia designata è la VI100. Il manufatto, interamente realizzato in Ti₃SiC₂ da un blocco di materiale grezzo fornito dall'azienda americana 3one2, non ha presentato particolari problemi di lavorazione meccanica. Sulla base dei disegni forniti dall'ENEA Brasimone è stata eseguita la girante mediante l'utilizzo combinato di una macchina utensile a 3 assi CNC e lavorazione per elettroerosione, la quale è stata possibile grazie alle peculiari proprietà del Ti₃SiC₂.

Ulteriori test dovranno essere indubbiamente svolti per convalidare questi primi risultati sperimentali.

 Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO	DOCUMENTO	DATA EMISSIONE:	PAGINA
	Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	adP ENEA-MSE LP3 (C)	19/02/09	
		HS-A-R-018	Rev: 0	18 of 19

Ringraziamenti

Si vuole ringraziare Massimo Agostini per l'eccellente lavoro svolto nell'esecuzione dei rilievi mediante metrologia delle due giranti e nell'esecuzione delle analisi sui campioni, Massimo Muzzarelli per il fondamentale contributo nella realizzazione dei disegni delle giranti e Mariano Tarantino per il fondamentale contributo tecnico fornito.

 Dipartimento Fusione, Tecnologie Presidio Nucleare Sezione Ingegneria Nucleare	TITOLO Rapporto di Progetto della Realizzazione girante pompa e test in piombo	DOCUMENTO adP ENEA-MSE LP3 (C)	DATA EMISSIONE: 19/02/09	PAGINA 19 of 19
		HS-A-R-018	Rev: 0	

Bibliografia

- [1] Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, OECD/NEA Nuclear Science Committee, Nuclear Science - ISBN 978-92-64-99002-9;
- [2] M. W. Barsoum, The Mn+1AX_n phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates. Progress in Solid State Chemistry, Vol. 28, 2000, p. 201-281;
- [3] M. W. Barsoum and T. El-Raghy, The MAX phases: unique new carbide and nitride materials, American Scientist 89, 2001, p. 336–345;
- [4] M. Fraczkiewicz, A.G. Zhou, M.W. Barsoum, "Mechanical damping in porous Ti₃SiC₂", Journal of Acta Materialia, 54 (2006) 5261–5270;
- [5] 3-ONE-2, LLC. www.3one2.com;
- [6] M. W. Barsoum and M. Radovic, Mechanical Properties of the MAX Phases, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier Science 2004, p. 1-16;
- [7] A. Gessi, G. Benamati, M. Utili, "Nuclear application steels compatibility with flowing Pb", EUROCORR 2008 7 - 11 September 2008, Edinburgh, Scotland;