



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di un codice di calcolo per valutare la resistenza a carichi termici di rivestimenti depositati su acciaio esposti a piombo liquido

Massimo E. Angiolini

SVILUPPO DI UN CODICE DI CALCOLO PER VALUTARE LA RESISTENZA A CARICHI TERMICI DI RIVESTIMENTI
DEPOSITATI SU ACCIAIO ESPOSTI A PIOMBO LIQUIDO

Massimo E. Angiolini ENEA

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, Gestione e Sviluppo, del Sistema Elettrico Nazionale

Progetto: Nuovo Nucleare da Fissione: Collaborazioni Internazionali e sviluppo Competenze in Materia Nucleare

Responsabile del Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

Titolo:

Sviluppo di un codice di calcolo per valutare la resistenza a carichi termici di rivestimenti depositati su acciaio esposti a piombo liquido

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: ACCORDO DI PROGRAMMA Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2011 Progetto 1.3.1: Energia nucleare: NUOVO NUCLEARE DA FISSIONE: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI E SVILUPPO COMPETENZE IN MATERIA NUCLEARE, PAR 2011.

Argomenti trattati: Reattori nucleari raffreddati a metalli liquidi, Calcolo agli elementi finiti, Trattamenti superficiali contro la corrosione

Sommario

Il presente rapporto descrive l'attività svolta nel periodo ottobre 2011- settembre 2012 nell'ambito dell'azione LP1-B2 dell'accordo di programma ENEA-MSE 2011-12.

L'attività si inserisce nel contesto delle ricerche su rivestimenti su materiali strutturali per migliorarne la resistenza alla corrosione da metalli liquidi pesanti e riguarda la simulazione, mediante il codice termomeccanico agli elementi finiti CAST3M, delle tensioni generate da carichi termici a simmetria assiale su rivestimenti depositati su acciaio.

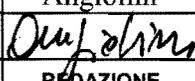
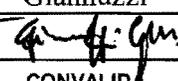
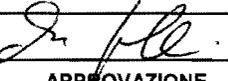
Lo studio è volto alla ottimizzazione delle proprietà di adesione e durabilità delle ricopertura al variare di stechiometria, parametri di deposizione, morfologia, stabilità termica e microstruttura dei rivestimenti, attraverso la riduzione delle tensioni generate all'interno del coating e fra coating e substrato dovute alle differenze nelle proprietà termiche e meccaniche dei materiali.

Il codice sviluppato è stato impiegato per simulare il comportamento di ricoperture della lega Al-Fe su due tipi di substrato: l'acciaio P91 e l'acciaio SS316. Sono state inoltre considerate, al fine di studiarne l'influenza sulle tensioni prodotte dall'esercizio, differenti geometrie della superficie del substrato e differenti spessori degli strati.

Note:

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	20-9-12	NOME	Massimo E. Angiolini	Giuseppe M. Giannuzzi	Massimo Sepielli
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

1. Introduzione**2. Meccanismi di rottura****3 Caratteristiche del codice sviluppato****4 Geometria del campione, carichi e condizioni al contorno****5 Materiali****6 Risultato delle simulazioni****6.1 Caso della superficie liscia****6.1.1 Calcolo delle tensioni residue****6.1.2 Calcolo delle tensioni residue: influenza dello spessore degli strati****6.1.3 Transitorio termico post deposizione****6.1.4 Transitorio termico post deposizione: influenza dello spessore degli strati****6.2 Caso della superficie ondulata****6.2.1 Calcolo delle tensioni residue****6.2.2 Calcolo delle tensioni residue: Influenza dello spessore****6.2.3 Transitorio termico post deposizione****6.2.4 Transitorio termico post deposizione: Influenza dello spessore****7 Conclusioni****8 Bibliografia****Appendice A) Istruzioni per per la creazione della griglia del provino con superficie liscia****Appendice B) Istruzioni per per la creazione della griglia del provino con superficie rugosa****Appendice C) Istruzioni per per il calcolo dei transitori termici ed relativi campi di tensione**

1. Introduzione

Uno dei principali problemi nello sviluppo dei reattori refrigerati a piombo e piombo-bismuto è legato alla corrosione degli acciai esposti al metallo liquido. La corrosione modificando la microstruttura, composizione e morfologia superficiale dell'acciaio ne modifica le proprietà ed il comportamento meccanico e rappresenta quindi un limite allo sviluppo di questi sistemi.

Una strategia per proteggere l'acciaio è quella di mantenere nel metallo liquido una concentrazione di sostanze passivanti, che inibiscano cioè la corrosione formando sulla superficie uno strato protettivo. Fra queste, lo Zirconio ed il Titanio che se presenti in soluzione nel piombo con concentrazioni intorno ai 50-500 ppm, formano uno strato di carburi e/o di nitruri sulla superficie a spese del carbonio e/o azoto presente nell'acciaio. Risultano molto efficienti per gli acciai al carbonio e per acciai basso legati mentre per l'acciaio inossidabile la loro efficienza è scarsa.

L'ossigeno è il più efficiente inibitore e quando presente disciolto nel metallo fuso, in un determinato intervallo di concentrazione, reagisce col Ferro Cromo e Nickel dell'acciaio formando uno strato protettivo di ossidi. Per basse concentrazioni di ossigeno, al di sotto di 10^{-7} at%, lo strato di ossido che si forma non è sufficiente a fermare la dissoluzione di componenti della lega e c'è corrosione che aumenta drammaticamente al diminuire del contenuto d'ossigeno. A concentrazioni di ossigeno intorno ai 10^{-6} at% lo strato ossidato che si forma è sufficiente a proteggere l'acciaio. Per contro aumentando il contenuto di ossigeno da questi valori si ha di nuovo un aumento della corrosione dovuto questa volta alla reazione con l'ossigeno ¹.

Sul controllo dell'ossigeno disciolto si basa la tecnica per la protezione della corrosione per gli acciai inossidabili adottata nei reattori ad uso militare sviluppati in Unione Sovietica: mantenendo la concentrazione di ossigeno attorno ai valori sopra detti si mantengono gli ossidi superficiali di ferro e cromo che limitano a valori trascurabili i tassi di dissoluzione dei componenti dell'acciaio.

Il controllo della concentrazione dell'ossigeno disciolto per la protezione dalla corrosione è di difficile applicazione a reattori di potenza per usi civili poichè comporta il non facile problema di monitorare il contenuto di ossigeno e mantenerlo a valori dati su volumi molto grandi con geometrie estremamente complicate.

Inoltre la tecnica non è efficace per temperature superiori ai 550 °C, poichè a queste temperature c'è un cambiamento nei meccanismi di corrosione. Sperimentalmente si osservano gravi attacchi di corrosione negli acciai austenitici mentre negli acciai martensitici si osserva un aumento dello spessore dello strato di ossido che diviene meccanicamente instabile e tende a staccarsi lasciando esposto il materiale al refrigerante. Le spesse scaglie di ossido rappresentano inoltre una barriera al trasferimento di calore ². E' quindi necessario adottare delle misure aggiuntive per proteggere quelle parti del reattore come le camicie del combustibile, wrappers e spacers che potrebbero raggiungere temperature fino a 650°C.

Una soluzione al problema è stata provata cercando di sviluppare acciai che formino uno strato passivante sulla superficie esposta al metallo liquido. E' stato dimostrato che l'aggiunta di silicio o/e alluminio negli acciai promuove la formazione di uno strato passivante di ossido, stabile anche ad elevate temperature. In questa direzione in Russia è stato sviluppato un acciaio martensitico (EP823) contenente silicio ³ ed acciai contenenti

alluminio⁴. Va comunque detto che l'aggiunta di questi elementi di lega peggiora le proprietà meccaniche e la resistenza all'irraggiamento dell'acciaio^{5,6}. Per questo c'è stato di recente l'impulso a sviluppare metodi per migliorare la resistenza alla corrosione per mezzo di trattamenti superficiali piuttosto che sviluppare nuovi materiali strutturali. Questo approccio ha l'evidente vantaggio di utilizzare materiali con proprietà note già codificate nelle normative senza andarne a modificarne la composizione e le proprietà massive.

Sono quindi in fase di sviluppo trattamenti superficiali realizzati con le più svariate tecniche di deposizione (GESA, diffusion coating, PVD, Shockwave Powder Coating etc.) al fine di produrre ricoperture passivanti con proprietà ottimali dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, capacità di rigenerazione in caso di rottura e stabilità sotto irraggiamento neutronico.

In un reattore ci si aspetta che ci siano durante la vita di un componente numerosi cicli di temperatura dovuti a escursioni di reattività, manutenzioni programmate, variazioni nel livello del pelo libero del refrigerante etc. con variazioni di temperatura dell'ordine delle centinaia di gradi ed intensi gradienti. La realizzazione di una ricopertura con le caratteristiche sopra dette rappresenta quindi una sfida non facile e richiede per la sua progettazione e realizzazione una conoscenza dettagliata dei meccanismi di rottura e delle sollecitazioni prodotte dalle condizioni operative.

La simulazione del comportamento di coating per mezzo di analisi agli elementi finiti permette di calcolare l'andamento delle tensioni generate dai carichi termici e meccanici e la loro redistribuzione per deformazione plastica e creep sotto carico meccanico e/o termico nelle condizioni di esercizio. Permette quindi l'ottimizzazione preliminare dei parametri del rivestimento come lo spessore e numero degli strati, delle loro proprietà termo meccaniche (scelta delle condizioni e tecnica di deposizione, scelta di uno strato di buffer e suo spessore etc. porosità etc.) consentendo un notevole risparmio di tempo e materiali nella messa a punto della struttura ottimale. Lo scopo è quello di trovare una struttura che minimizzi gli sforzi e le deformazioni alle interfacce fra gli strati durante l'esercizio e ridurre così al minimo la propensione per la delaminazione, deformazione plastica, e frattura del rivestimento^{7,8}.

Questo studio si inserisce nell'ambito di queste ricerche e riguarda la simulazione termico-strutturale in campo non lineare, con simulazione tramite il codice agli elementi finiti Cast3M, delle tensioni prodotte da carichi termici su rivestimenti su acciaio.

2. Meccanismi di rottura dei rivestimenti

I fattori che portano al deterioramento e rottura dei rivestimenti sotto l'azione di carichi termici, sono principalmente le tensioni generate dalle differenze nel coefficiente di dilatazione termica, dai gradienti di temperatura e le tensioni associate alle modifiche microstrutturali dovute all'esercizio, come ad esempio reazioni a stato solido col substrato o con l'atmosfera cui il rivestimento è esposto. In presenza di transitori termici bisogna considerare inoltre che le differenze nel comportamento termico degli strati possono generare o esacerbare i gradienti.

Gli stati tensionali di origine termica fra gli strati del coating e fra il coating ed il substrato possono portare a rottura secondo vari meccanismi. Il caso più semplice si ha quando le tensioni termiche eccedono il carico di rottura di uno o più strati del coating.

Nel caso invece in cui le sollecitazioni non portino direttamente a rottura, il substrato od uno degli strati del coating possono essere sottoposti a tensioni cicliche. Nel caso di sollecitazioni in campo elastico si può avere cedimento per fatica se il numero di cicli è elevato.

Nel caso di sollecitazioni eccedenti il limite elastico, in seguito a cicli termici si avrà plasticità ciclica. Anche questa possibilità seppure non porti alla rottura diretta del rivestimento può portare a rottura secondo due meccanismi.

Se il sistema non accumula deformazione plastica e si riporta alla condizione di partenza al termine di ogni ciclo (sia cioè in condizione di shakedown), bisogna considerare la possibilità che uno strato si rompa per fatica oligociclica.

Nel caso invece che ad ogni ciclo ci sia un accumulo di deformazione plastica nel coating o nel substrato, coll'aumentare del numero di cicli, l'incremento progressivo di deformazione plastica (ratchetting) sarà tale da portare alla rottura del coating in un numero limitato di cicli. Considerando ad esempio un coating fragile con elevato punto di rottura su un substrato plastico con basso valore della tensione di snervamento, sottoponendo il sistema a cicli di temperatura, seppure le tensioni generate non inducano delaminazione o frattura del coating durante ogni singolo shock termico, il substrato andrà in plasticità e se c'è un accumulo di deformazione ad ogni ciclo, all'aumentare del numero di cicli la deformazione accumulata comporterà tensioni che eccedono il limite di rottura del coating^{9,10}.

Il comportamento viscoplastico o plastico inoltre può cambiare la rugosità dell' interfaccia (formazione di bande di intrusione ed estrusione) producendo geometrie che agiscono come punti di concentrazione delle tensioni che possono innescare o accelerare la rottura coi meccanismi visti sopra. La presenza di asperità e ondulazioni delle interfacce oltre ad agire come fattore di concentrazione degli sforzi può generare tensioni normali all'interfaccia che se di intensità sufficiente possono staccare localmente il rivestimento stesso ed innescare processi che portano alla delaminazione e rottura.

Nel caso di coatings sottoposti ad elevate temperature va inoltre tenuto in considerazione che le proprietà termo meccaniche possono subire variazioni anche sensibili per via di processi di sintering, precipitazione e/o trasformazioni di fase nel coating, così come reazioni a stato solido col substrato con modalità e morfologie che dipendono dal caso in esame.

Oltre alle variazioni delle proprietà fisiche, le reazioni a stato solido, come ad esempio la reazione alle interfacce con la formazione di un nuovo strato, comportano stati di tensione associati alle deformazioni indotte dalla crescita della una nuova fase cristallina.

3. Caratteristiche del codice sviluppato

I carichi di interesse per un coating sono le tensioni residue, i carichi di natura termica di cui si è detto nel punto precedente ed i carichi meccanici esterni.

Le tensioni residue, che sono le tensioni presenti nel materiale in assenza di carichi applicati, sono dovute al processo di deposizione e derivano da tre contributi, le sollecitazioni termiche residue, gli tensioni intrinseche e le tensioni estrinseche. Le sollecitazioni termiche residue derivano dalle differenze nel coefficiente di dilatazione termica tra rivestimento e substrato per cui, durante il raffreddamento dalla temperatura di deposizione alla temperatura ambiente, emergono delle deformazioni cui è associato uno stato di tensione che può essere stimato nell'ipotesi di un comportamento elastico dei materiali dalla la relazione seguente¹¹:

$$\sigma_{th} = (E_f / (1 - \nu_f)) (\alpha_s - \alpha_f) (T_r - T_s)$$

Dove E_f e ν_f sono rispettivamente il modulo di Young e coefficiente di Poisson del film, α_s ed α_f i coefficienti di dilatazione termica del substrato e del coating T_s temperatura di deposizione e T_r temperatura di riferimento.

Le tensioni intrinseche sorgono durante il processo di crescita e sono legate alle modalità di nucleazione ed accrescimento del coating sul substrato e dalla sua microstruttura.

Le tensioni estrinseche sono legate alla penetrazione ed adsorbimento di specie chimiche nella porosità del coating che causano variazioni locali di volume e conseguentemente stati di deformazione.

La conoscenza del campo di tensioni residue è di fondamentale importanza poichè contribuisce insieme alle tensioni applicate, di natura termica o meccanica, a determinare lo stato di tensione del sistema. Nel codice sviluppato le tensioni residue vengono stimate trascurando le tensioni intrinseche ed estrinseche. Queste dipendono fortemente dai materiali e dal tipo di tecnica usata per la deposizione e devono essere valutate sperimentalmente caso per caso. Si suppone che la deposizione sia avvenuta col campione soggetto ad un determinato campo di temperatura durante la fase di deposizione e che in questo stato il sistema sia libero da tensioni. Viene quindi eseguito un raffreddamento che porta il campione alla temperatura ambiente perdendo calore verso l'ambiente. L'evoluzione del campo di temperature ad ogni passo temporale viene quindi impiegata per il calcolo delle tensioni residue termiche.

La valutazione delle tensioni residue è preliminare alla simulazione delle tensioni termiche generate da un transitorio che simula una condizione operativa in cui il campione è sottoposto ad un flusso di potenza su una regione della superficie esterna o da una sorgente di calore all'interno, per un tempo fissato.

L'andamento temporale del campo di temperatura che si ottiene viene impiegato per il calcolo delle tensioni termiche: il campo di tensioni residue e la relativa deformata, calcolate in precedenza, vengono poste come condizione iniziale nel calcolo delle tensioni sviluppate nel successivo transitorio di temperatura.

4. Geometria del campione, carichi e condizioni al contorno

Il codice sviluppato è stato impiegato per simulare le tensioni termiche prodotte su una ricopertura di una lega di alluminio e ferro, depositata su un provino cilindrico vuoto all'interno di raggio interno 5mm e spessore di 1 mm. Si è considerato un coating composto da due strati depositati sulla superficie esterna, uno di interfaccia col substrato ed uno esterno. Il provino ricoperto è rappresentato in sezione in figura 1 dove la maglia del substrato è in nero, in verde lo strato di interfaccia ed in rosso lo strato esterno.

Per migliorare la risoluzione nella regione dove si hanno variazioni delle proprietà termomeccaniche a livello microscopico, la griglia è stata raffinata in prossimità della zona del coating e partendo da elementi con dimensioni intorno ai 50 μm nel substrato arriva ad elementi con dimensioni laterali intorno al μm nella regione del coating.

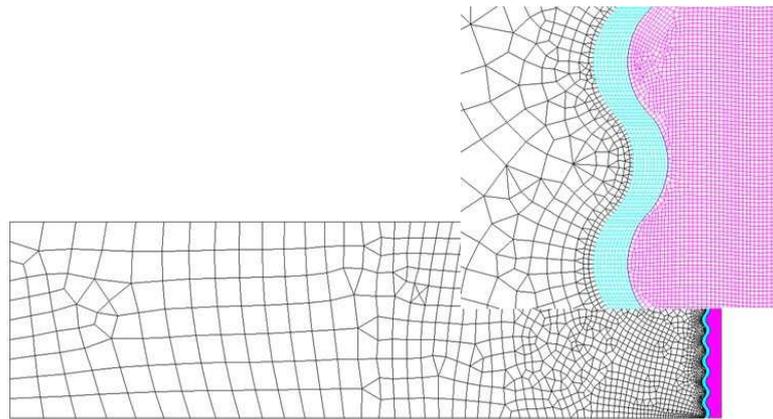


Figura 1 Griglia utilizzata per calcolo. In bianco il substrato, in verde l'interfaccia ed in rosso il coating. La griglia si infittisce in prossimità dell'interfaccia.

Tutti i materiali dei componenti il sistema substrato/coating si sono considerati omogenei ed isotropi e per le grandezze meccaniche e termiche sono stati usati gli andamenti in temperatura, si è assunta continuità fra il substrato ed il coating e fra gli strati del coating. Per valutare l'effetto della rugosità della superficie del substrato sull'evoluzione delle tensioni termiche nel coating, oltre alla simulazione su un provino con superfici di separazione fra gli strati perfettamente lisce, è stata presa in considerazione una morfologia superficiale rappresentata in sezione da una curva periodica composta da quarti di circonferenza di raggio $20\ \mu\text{m}$ ed avente come lunghezza d'onda $56,6\ \mu\text{m}$, come mostrato in figura 1.

Il calcolo è stato eseguito in modo assialsimmetrico.

Lo spessore degli strati è stato variato e sono stati considerati i valori di $10\ \mu\text{m}$ e $40\ \mu\text{m}$ per gli strati di interfaccia ed esterno mantenendo lo spessore totale del coating a $50\ \mu\text{m}$.

Per vincolo è stato imposto che i nodi sul fondo del cilindro possano muoversi solo in direzione radiale con la coordinata verticale nulla e che i nodi sulla parte superiore del cilindro abbiano stessa coordinata verticale.

In tutti i casi considerati le tensioni residue sono state calcolate supponendo che la deposizione sia avvenuta ad una temperatura uniforme di $550\ ^\circ\text{C}$ seguita da un raffreddamento in aria per convezione naturale alla temperatura ambiente a $25\ ^\circ\text{C}$.

Il transitorio termico successivo al calcolo delle tensioni residue è stato fatto supponendo il campione soggetto ad un flusso di potenza dalla superficie interna del cilindro e perdita di calore da tutta la superficie per convezione naturale verso l'ambiente (aria) a $25\ ^\circ\text{C}$.

Il flusso di potenza è stato variato in modo da ottenere un campo di temperatura simile per tutte le simulazioni a meno di qualche grado. In figura 2 è riportato il campo di temperatura al termine del transitorio.

L'analisi è stata condotta con l'attenzione rivolta ai valori di picco delle componenti del campo di tensioni e ai valori di deformazione plastica.

Per facilitare l'analisi dei risultati oltre alla rappresentazione dei campi di tensione, così come la deformazione plastica con mappe a colori, vengono riportati gli andamenti dei campi lungo linee di appoggio dirette lungo il raggio con una estremità nel substrato e l'altra sulla superficie esterna del coating come mostrato in figura 3 a). Nella discussione dei

risultati nel caso di superficie rugosa è stata adottata la nomenclatura mostrata in figura 3 b).

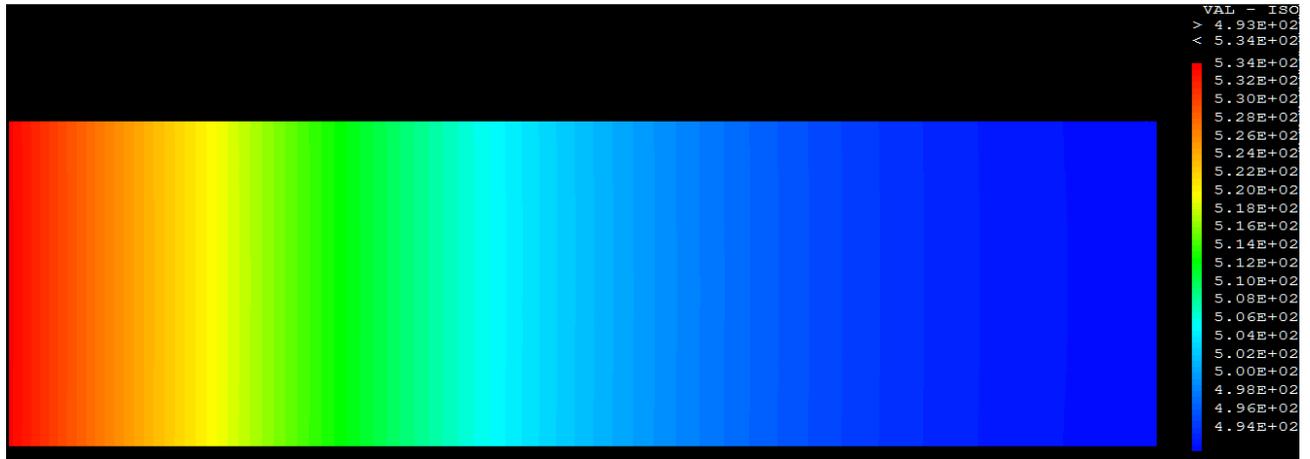


Figura 2 Campo di temperatura al termine del transitorio che simula la variazione di temperatura per effetto di un flusso di energia dall'interno del provino.

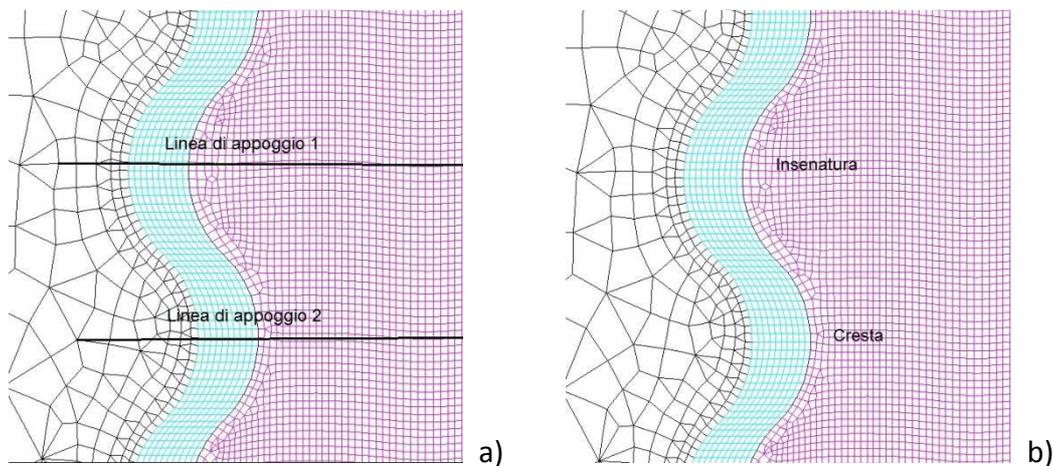


Figura 3 a) Linee di appoggio per lo studio dell'andamento delle tensioni e b) nomenclatura utilizzata nella descrizione dei risultati .

In tabella 1 è riportato il quadro sinottico delle simulazioni effettuate. In ciò che segue verrà adottata la nomenclatura riportata nella tabella. Ciascuna delle simulazioni listate è costituita da due parti, una relativa al calcolo delle tensioni residue dovute al processo di deposizione ed una seconda relativa al calcolo delle tensioni relative al transitorio di temperatura che simula una condizione operativa. In ciò che segue si farà riferimento alla prima come "calcolo delle tensioni residue" ed alla seconda come "transitorio post deposizione".

Tabella 1 Quadro riassuntivo delle simulazioni effettuate

Materiale del substrato	Spessore strato di interfaccia Fe₃Al	Spessore strato esterno FeAl	Superficie liscia	Superficie ondulata
P91	10 µm	40 µm	Simulazione P91_10L	Simulazione P91_10R
P91	40 µm	10 µm	Simulazione P91_40L	Simulazione P91_40R
SS316	10 µm	40 µm	Simulazione 313_10L	Simulazione 313_10R
SS316	40 µm	10 µm	Simulazione 316_40L	Simulazione 316_40R

5. Materiali

Riguardo alle relazioni costitutive sono state fatte alcune simulazioni supponendo per i materiali un comportamento elastico isotropo ottenendo valori superiori alla tensione di snervamento sia nel substrato che nella regione del coating, sia nella simulazione delle tensioni residue che per quella relativa al calcolo delle tensioni dopo transitorio post deposizione. Si è quindi deciso di eseguire tutte le simulazioni considerando un comportamento elastico isotropo perfettamente plastico non avendo a disposizione i dati per poter eseguire simulazioni con modelli più raffinati.

Per lo strato di interfaccia è stato considerato l'intermetallico Fe₃Al con struttura DO₃ mentre per lo strato esterno del coating si è preso l'intermetallico FeAl con struttura B2 e concentrazione molare 48.71%Al 50.87% Fe. Con ciò si è voluto simulare il caso del tutto ipotetico, seppure verosimile, della deposizione di un coating con concentrazione del 30% in peso circa in alluminio e la formazione all'interfaccia col substrato di uno strato più ricco in ferro con struttura DO₃ per diffusione del ferro durante la deposizione. Il calcolo è stato fatto trascurando le tensioni associate alla crescita dello strato di interfaccia.

Per il substrato si sono considerati due casi l'acciaio SS316 ed il P91 che sono due dei principali materiali proposti per componenti di reattori di IV generazione.

Nelle tabelle ed i grafici seguenti sono riportati i valori delle grandezze impiegate nelle simulazioni.

I valori riportati seppure riferiti a campagne di misura oggetto di pubblicazione su riviste internazionali, sono del tutto indicativi in quanto non sono omogenee cioè riferiti ad uno stesso set di campioni. Gli intermetallici FeAl e Fe₃Al con strutture B2 e DO₃ rispettivamente esistono per intervalli di concentrazione piuttosto ampi al di fuori della stechiometria data dal diagramma di fase di equilibrio con strutture difettive cui competono proprietà termomeccaniche fortemente dipendenti dalla microstruttura^{12, 13, 14}. Inoltre, in generale, le proprietà fisiche dei coatings sono fortemente dipendenti dalle condizioni e dal processo di deposizione impiegato.

I risultati che seguono hanno quindi carattere puramente speculativo e possono essere di aiuto per meglio comprendere l'influenza ed il peso relativo delle grandezze caratteristiche

dei materiali impiegati e dei fattori geometrici, sugli stati di tensione prodotti da carichi termici.

Tabella 2 Modulo di Young GPa														
T° C	20	100	200	300	350	400	450	500	510	550	600	650	850	
SS316	200	193	185	176	172	168	164	159		155	151			Ref.15
P91	206	201	194	188	185	182	178	175		163	151			Ref.15
Fe ₃ Al	161	147							123			116	96	Ref.16
FeAl	261	247							223			196	176	Ref.16

Tabella 3 Coefficiente di Espansione Termica (TEC) 1.e-6*mm/mm°C										
T° C	20	100	200	300	400	500	600	700		
SS316	15	15,9	16,6	17,2	17,8	18,3	18,7	19		Ref.15
P91	10	10,8	11,2	11,6	11,9	12,2	12,5	12,7		Ref.15
Fe ₃ Al	16	16,5	17	19	21	26	26	27		Ref.17
FeAl	16	16,8	18,4	19	19,6	20,2	20,8	21,2		Ref.13

Tabella 4 Tensione di Snervamento MPa											
T° C	20	25	50	100	125	150	200	225	250	300	
SS316	235			196			159			135	Ref.15
P91		420	400	375		367	362		359	355	Ref.15
Fe ₃ Al		780			780			780			Ref.18
FeAl		1050			1040			100			Ref.19
T° C	325	350	400	425	450	500	525	550	600	625	
SS316		126	120		115	110		106			Ref.15
P91		349	338		320	292		254	203		Ref.15
Fe ₃ Al	650			550			450			350	Ref.18
FeAl	800			525			250			170	Ref.19

Tabella 5 Conducibilità Termica 0.001*									
T° C	20	100	200	300	400	500	600	700	
SS316	14	15,5	17	18,5	20	21,5	22,99		Ref.15
P91	26	27	28,1	28,8	29,2	29	28,5		Ref.15
Fe ₃ Al	14	14,2	16	17	18	19	20		Ref.20
FeAl	9,6	11,2	12,4	13,6	14,4	15,5	16,2	16,8	Ref.17

Tabella 6 Densità 1.e-9* kg/mm3

T °C	20	100	127	200	227	300	327	400	427	500	527	600	
SS316	7930	7899		7858		7815		7770		7724		7677	Ref.15
P91	7730	7710		7680		7650		7610		7580		7540	Ref.15
Fe3Al	7015		6997		6983		6969		6945		6930	6900	Ref.17
FeAl	5522		5508		5497		5486		5469		5456	5439	Ref.16

Tabella 7 Calore Specifico Cp J/Kg K

T°C	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	
SS316	472	485	501	512	522	530	538	546	556	567	578	590	561	Ref.15
P91	448,9	463	484	504	523	542	562,7	584,9	610	639	672	710,25	755	Ref.15
Fe3Al	560	580	600	615	620	630	650	655	660	670	680	690	700	Ref.13
FeAl	560	580	600	615	620	630	650	655	660	670	680	690	700	Ref.13

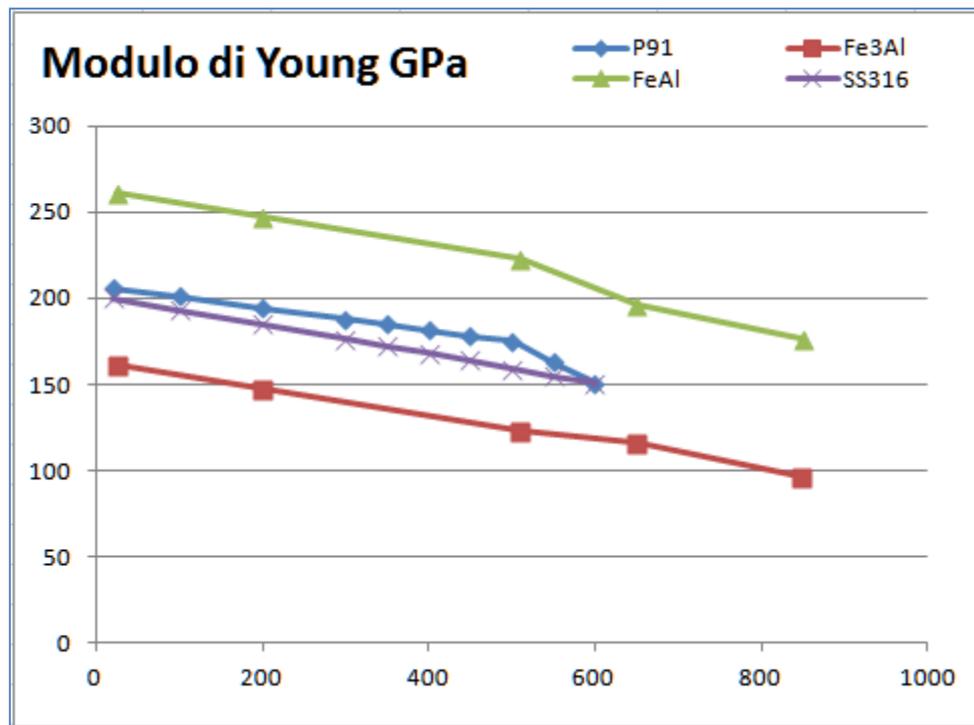


Grafico 1 Andamento del modulo di Young con la temperatura per i tre materiali considerati.

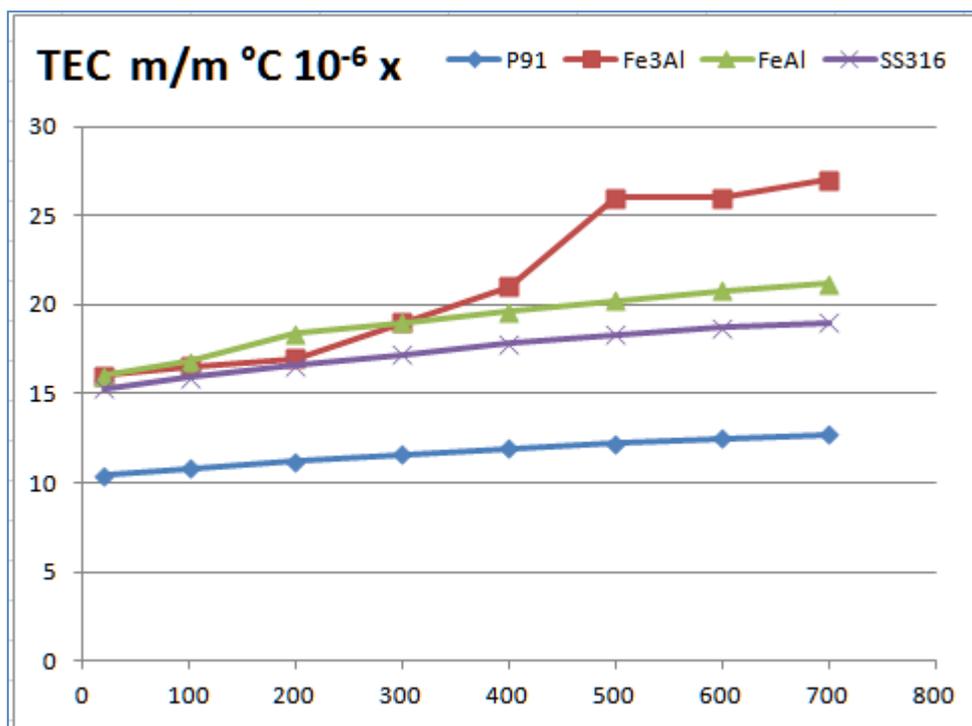


Grafico 2 Andamento del coefficiente di espansione termica con la temperatura per i tre materiali considerati.

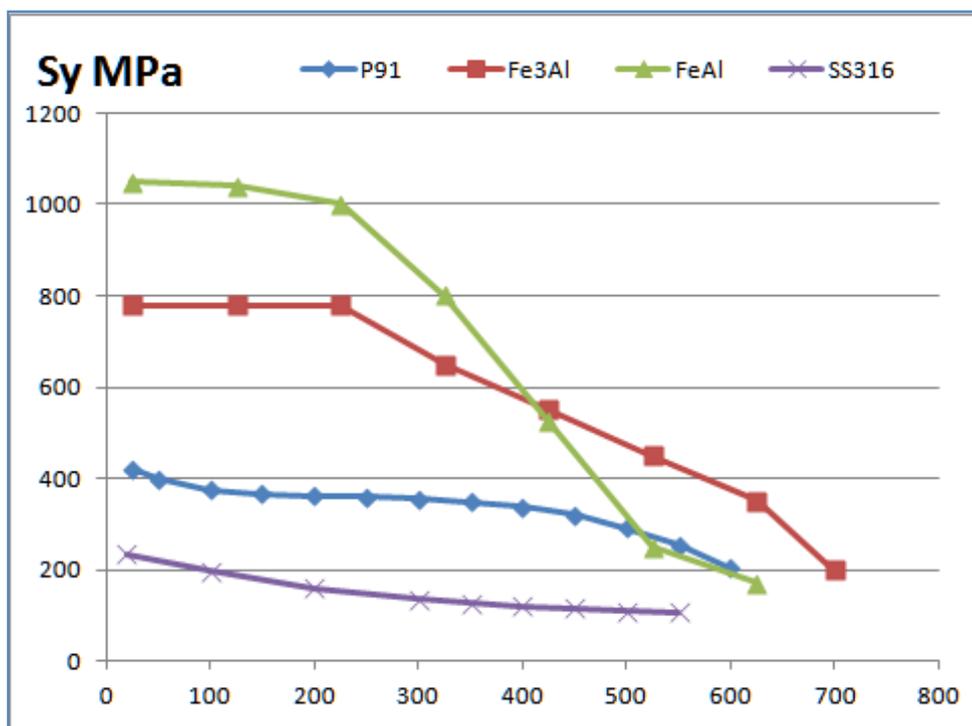


Grafico 3 Andamento della tensione di snervamento con la temperatura per i tre materiali considerati.

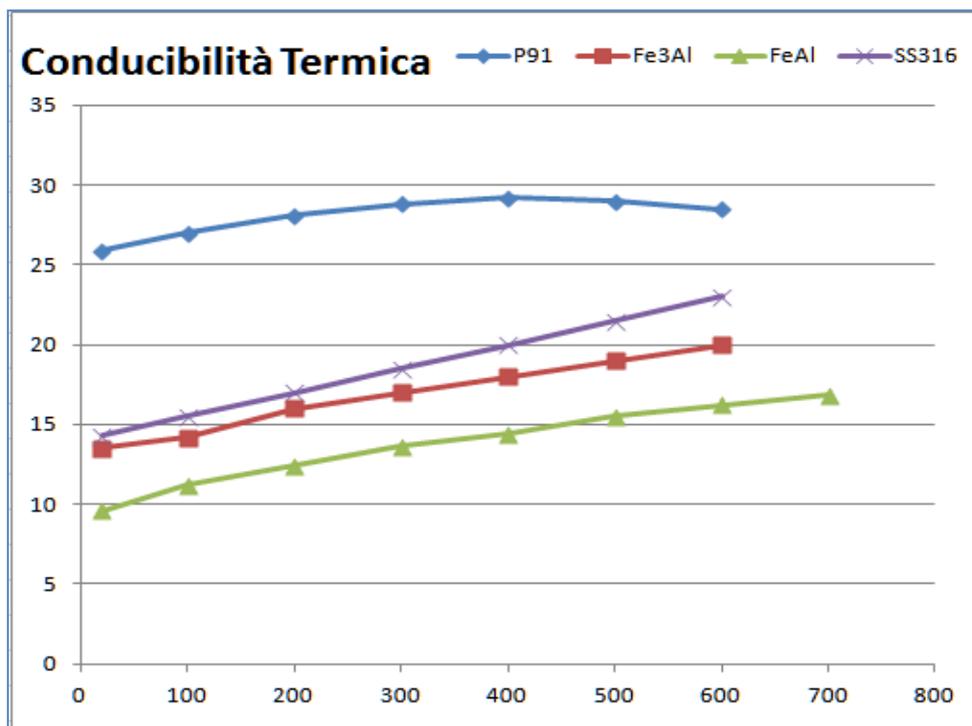


Grafico 4 Andamento della conducibilità termica con la temperatura per i tre materiali considerati.

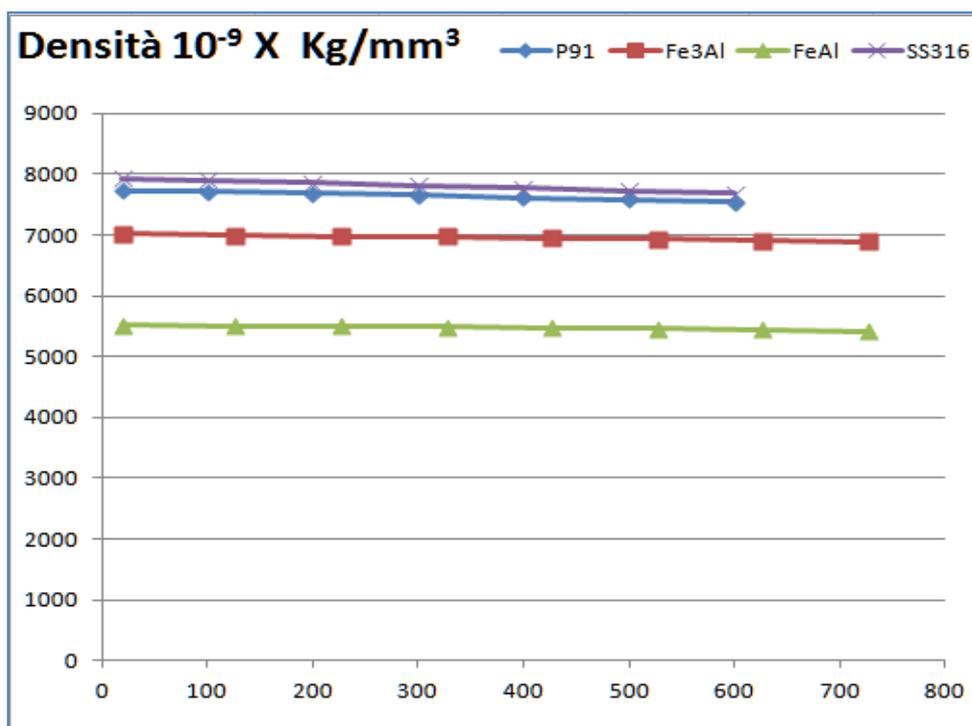


Grafico 5 Andamento della densità con la temperatura per i tre materiali considerati.

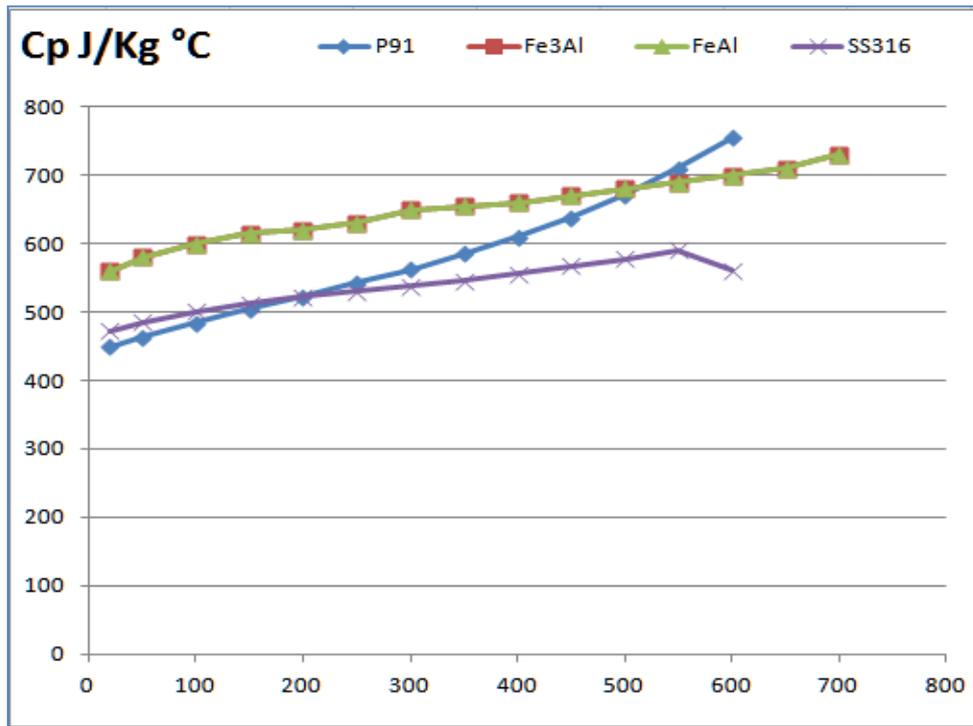


Grafico 6 Andamento del calore specifico con la temperatura per i tre materiali considerati.

6. Risultato delle simulazioni

6.1. Caso della superficie liscia

Sia per le tensioni residue conseguenti al processo di deposizione, che per il campo di tensioni dovuto al successivo transitorio termico post deposizione, il campo di tensioni è nullo per la componente radiale e le componenti di taglio e, come ci si aspetta che sia, le tensioni giacciono in un piano parallelo al piano tangente alla superficie esterna del substrato.

6.1.1 Calcolo delle tensioni residue

Le figure 4 e 5 mostrano l'andamento delle tensioni residue lungo una linea di appoggio per i due substrati. In tutti i casi le componenti assiali e circonferenziale (hoop) del campo di tensioni nel coating sono positive in ragione dei maggiori coefficienti di dilatazione termica dei due strati del rivestimento rispetto ai substrati. Si ottengono valori di 780 MPa per lo strato di interfaccia e di 370 MPa per lo strato esterno quando il substrato è SS316. Per il campione depositato su P91 si ottiene lo stesso valore di 780 MPa per l'interfaccia ed il valore di 1050 MPa per lo strato esterno.

I valori 780 MPa e 1050 MPa sono la tensione di snervamento per lo strato di interfaccia e strato esterno rispettivamente, alla temperatura di 25°C.

Nel caso di substrato SS316 in cui i materiali del coating hanno valori simili al substrato per i coefficienti di dilatazione termica, lo strato di interfaccia, che ha valore più basso di tensione di snervamento, si deforma plasticamente durante tutto il transitorio, con valori finali della

tensione equivalente di Von Mises pari alla tensione di snervamento e mantenendo le tensioni residue dello strato esterno a valori inferiori ai 370 MPa (fig. 6).

Nel caso di substrato P91 le differenze nel coefficiente di dilatazione termica fra coating e substrato sono tali da generare tensioni che eccedono la tensioni di snervamento in entrambi gli strati del coating che quindi si deformano entrambi plasticamente durante tutto il transitorio con valori finali della tensione equivalente di Von Mises pari alle tensioni di snervamento (fig. 7).

La deformazione plastica totale (figg. 8 e 9) è nulla nel substrato e nello strato esterno mentre nello strato di interfaccia ha valori al di sotto di 1.3×10^{-3} nel caso di substrato SS316. Nel caso di substrato P91 entrambi gli strati si sono deformati plasticamente con valori massimi di 7.7×10^{-3} nello strato di interfaccia.

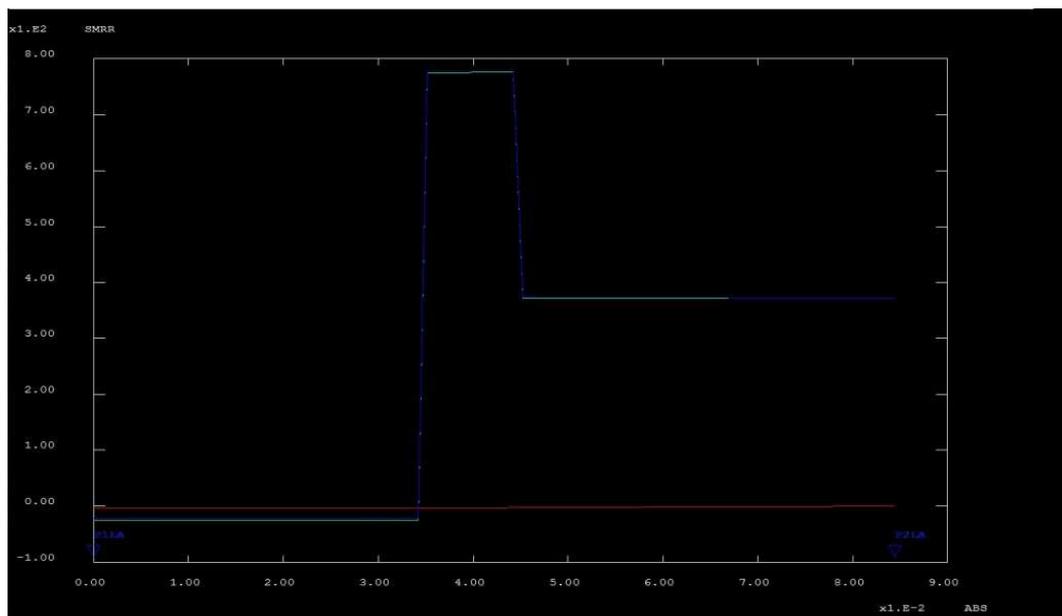


Figura 4 Andamento delle componenti del campo di tensioni residue (simulazione 316_10L) lungo una linea di appoggio per il substrato SS316 (rosso RR verde ZZ blu TT).

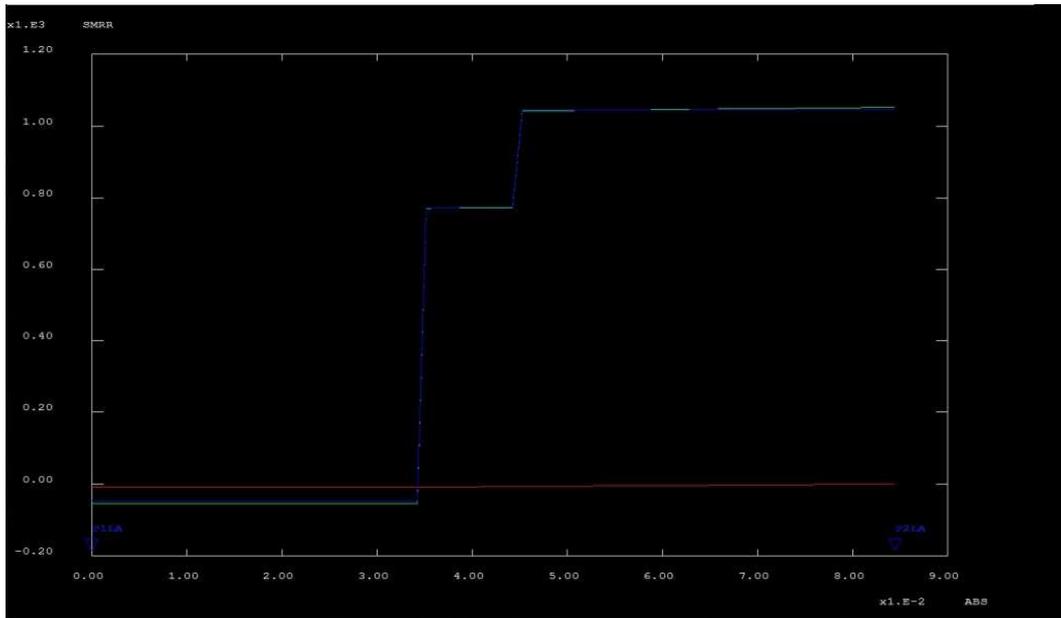


Figura 5 Andamento delle componenti del campo di tensioni residue (simulazione P91_10L) lungo una linea di appoggio per il substrato P91 (rosso RR verde ZZ blu TT).

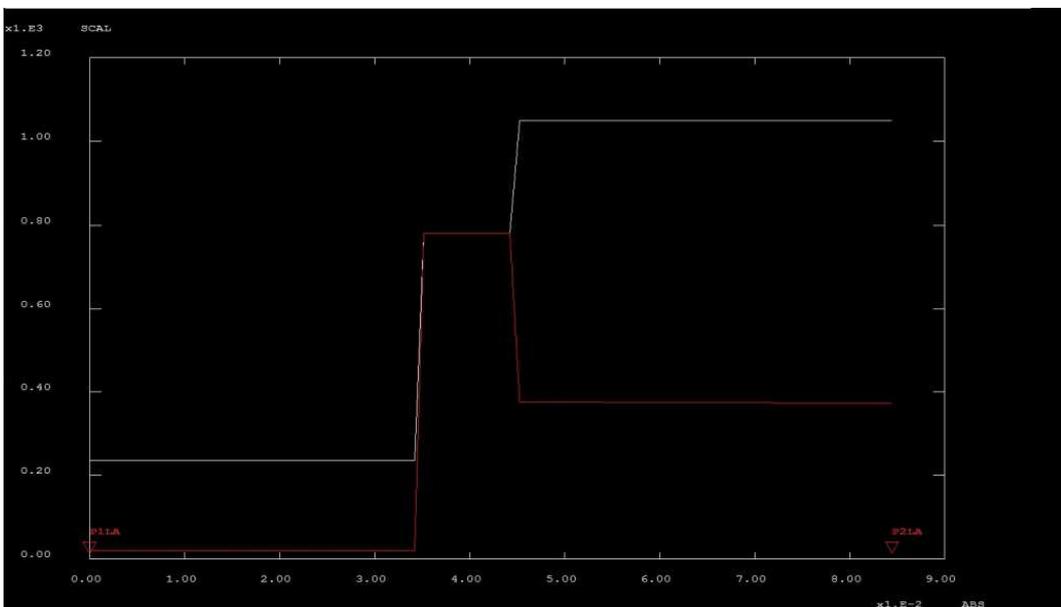


Figura 6 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue (simulazione 316_10L) lungo una linea di appoggio per il substrato SS316. In bianco la tensione di snervamento.

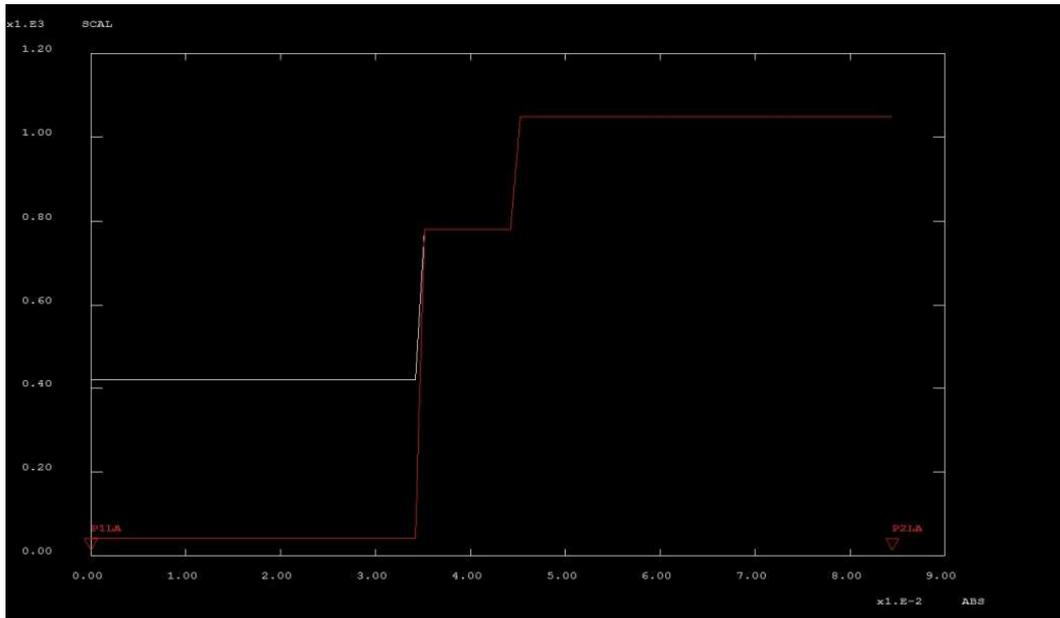


Figura 7 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue (simulazione P91_10L) lungo una linea di appoggio per il substrato P91. In bianco la tensione di snervamento.

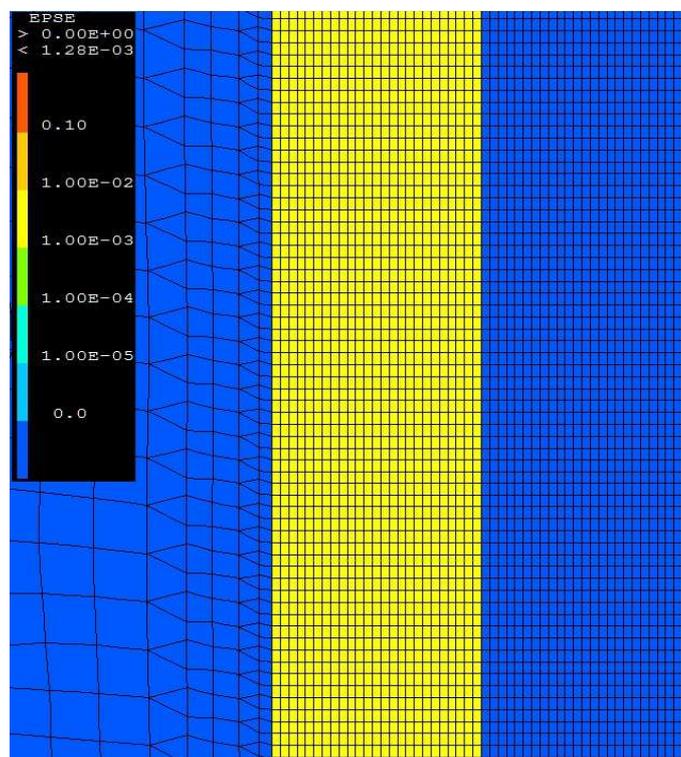


Figura 8 La deformazione plastica totale dovuta al rilassamento delle tensioni residue nel caso di substrato SS316 (simulazione 316_10L).

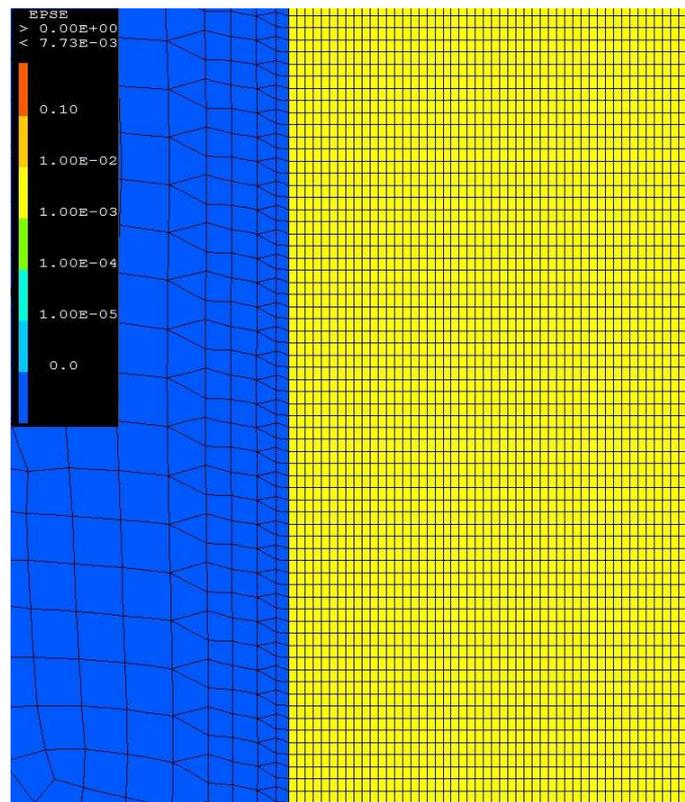


Figura 9 La deformazione plastica totale dovuta al rilassamento delle tensioni residue nel caso di substrato P91 (simulazione P91 _10L).

6.1.2 Calcolo delle tensioni residue: influenza dello spessore degli strati

Dalle figure da 10 a 13, che mostrano l'andamento delle componenti del campo di tensioni residue e della tensione equivalente di Von Mises lungo una linea di appoggio per il due substrati si vede che nel caso di substrato P91 non ci sono differenze al variare dello spessore degli strati: il coating si deforma plasticamente durante tutto il periodo di raffreddamento e le tensioni residue sono pari alla tensione di snervamento degli strati alla temperatura finale.

Nel caso di substrato SS316 solo lo strato di interfaccia si deforma plasticamente per tutti gli spessori considerati e lì si trovano valori di tensione residua pari alla tensione di snervamento a temperatura ambiente. Aumentando lo spessore dello strato di interfaccia (che mantiene valori di tensione residua pari alla tensione di snervamento), aumenta la deformazione plastica dello strato (aumenta il volume di materiale che si deforma plasticamente) e si osserva nello strato esterno una diminuzione delle tensioni residue da valori intorno ai 390 MPa (per l'interfaccia spessa 10 μm) ai 350 MPa (per l'interfaccia di 40 μm).

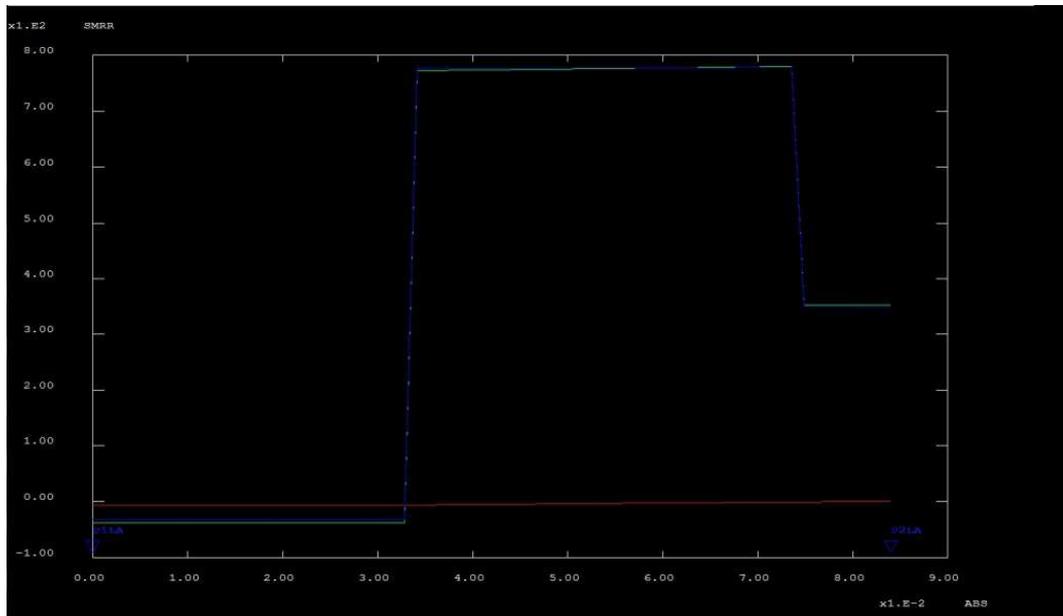


Figura 10 Andamento delle componenti del campo di tensioni residue (simulazione SS316_40L) lungo una linea di appoggio per il substrato SS316 (rosso RR verde ZZ blu TT).

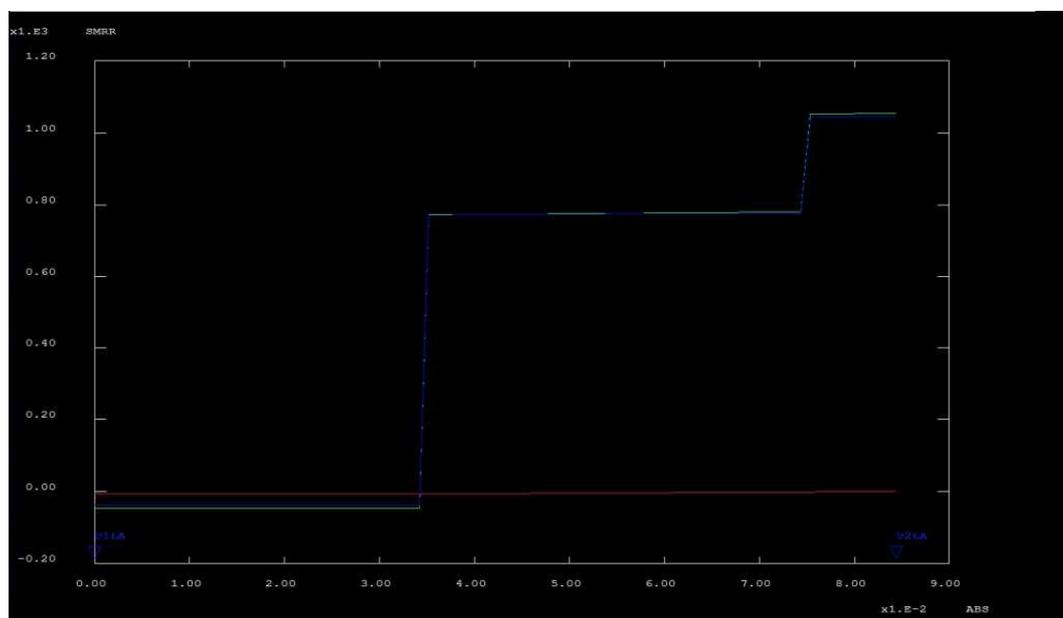


Figura 11 Andamento delle componenti del campo di tensioni residue (simulazione P91_40L) lungo una linea di appoggio per il substrato P91 (rosso RR verde ZZ blu TT).

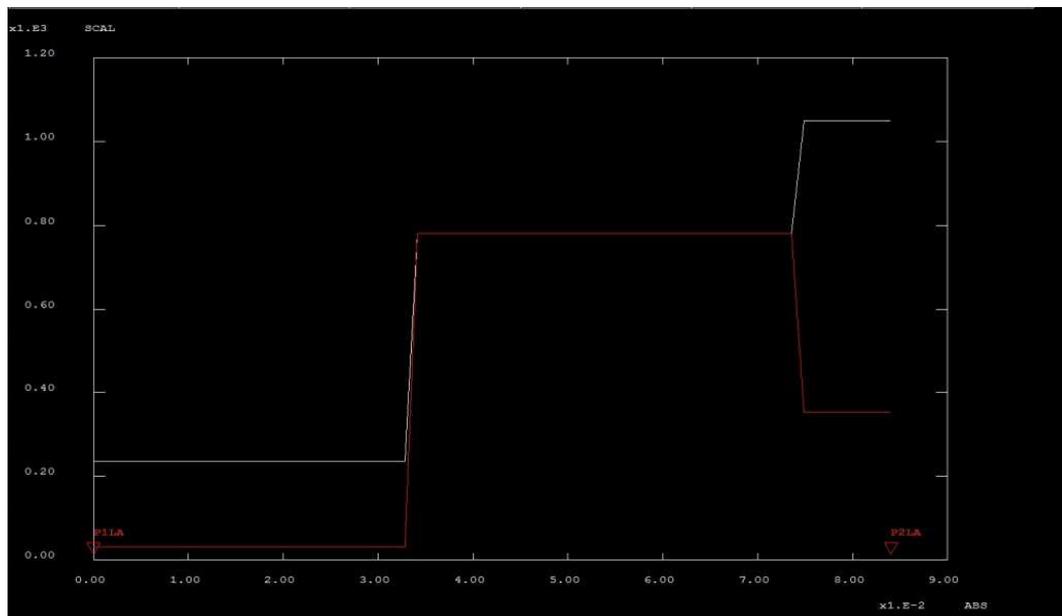


Figura 12 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo una linea di appoggio per il substrato SS316 (simulazione SS316_40L). In bianco la tensione di snervamento.

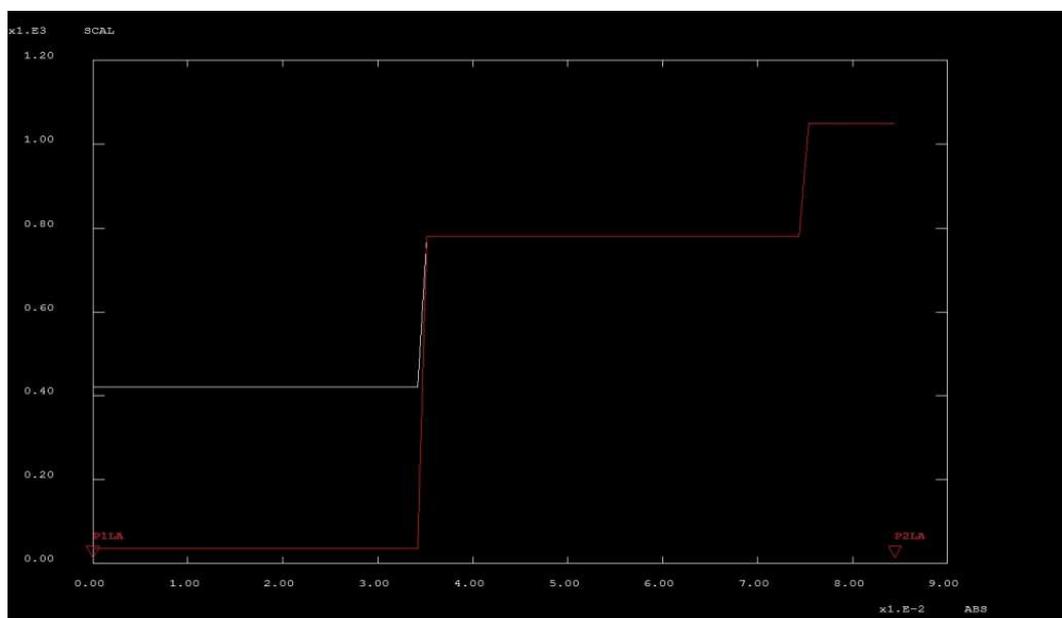


Figura 13 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo una linea di appoggio per il substrato P91 (simulazione P91_40L). In bianco la tensione di snervamento.

6.1.3 Transitorio termico post deposizione

Dopo il transitorio ottenuto scaldando il cilindro dall'interno, nel campione depresso su SS316 (figg. 14 e 15 simulazione 316_10L), l'interfaccia è in compressione con le componenti assiale e di hoop con valori intorno a -50 MPa, mentre nello strato esterno le componenti sono in tensione con valori intorno a 180 MPa. Al termine del transitorio la tensione equivalente di Von Mises risulta ben al di sotto dei valori di snervamento.

Nel caso di substrato P91 (figg 16 e 17 simulazione P91_10L) entrambi gli strati sono in compressione. Nello strato di interfaccia le tensioni eccedono la tensione di snervamento durante tutto il transitorio ed alla fine le componenti assiale e di hoop hanno valori intorno ai -480 MPa e la tensione equivalente di Von Mises è pari alla tensione di snervamento alla temperatura finale (che è appunto circa 480 MPa). Lo strato esterno ha valori della componente di hoop ed assiale intorno ai -200 MPa vicino all'interfaccia che decrescono andando verso l'esterno.

6.1.4 Transitorio termico post deposizione: influenza dello spessore degli strati

Al termine del riscaldamento nel caso di substrato SS316 (fig. 18, simulazione SS316_40L) non si osservano differenze al variare dello spessore degli strati mentre (fig. 19) nel caso di P91 (simulazione P91_40L), dove la tensione equivalente di Von Mises eccede la tensione di snervamento, diminuiscono le tensioni dopo il transitorio al crescere dello spessore dell'interfaccia da 10 a 40 μm .

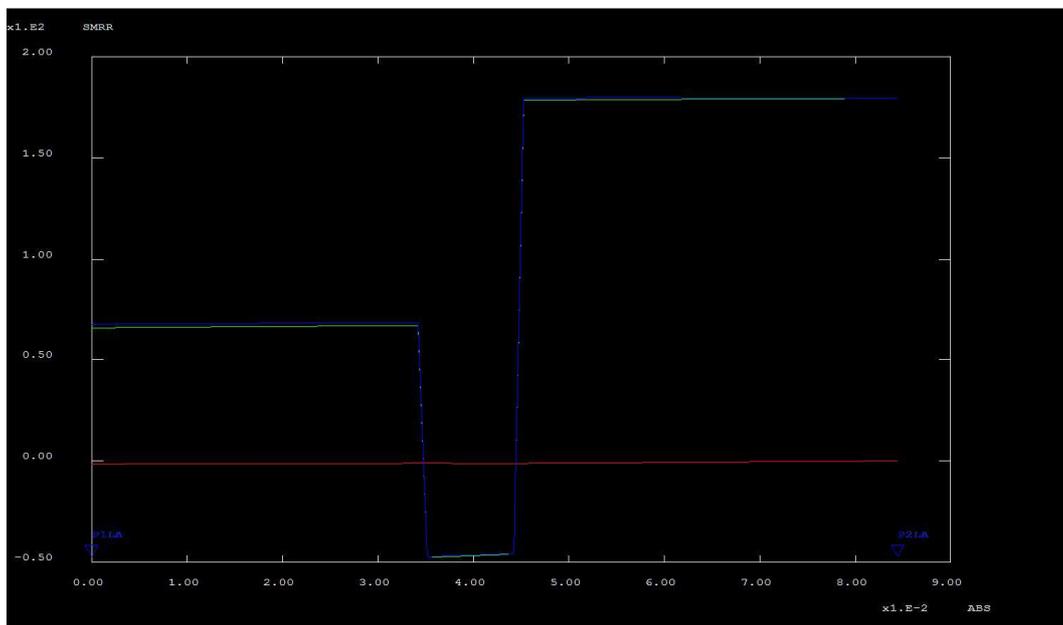


Figura 14 Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato SS316 (simulazione 316_10L , rosso RR verde ZZ blu TT).

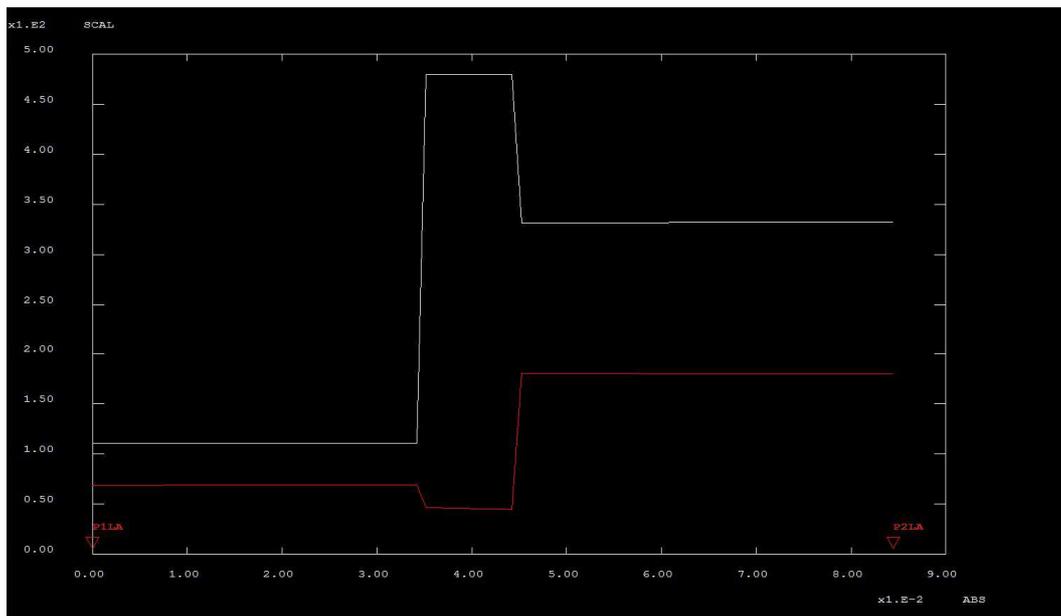


Figura 15 Andamento dellatensione equivalente di Von Mises (rosso) del dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato SS316 (simulazione 316_10L). In bianco la tensione di snervamento.

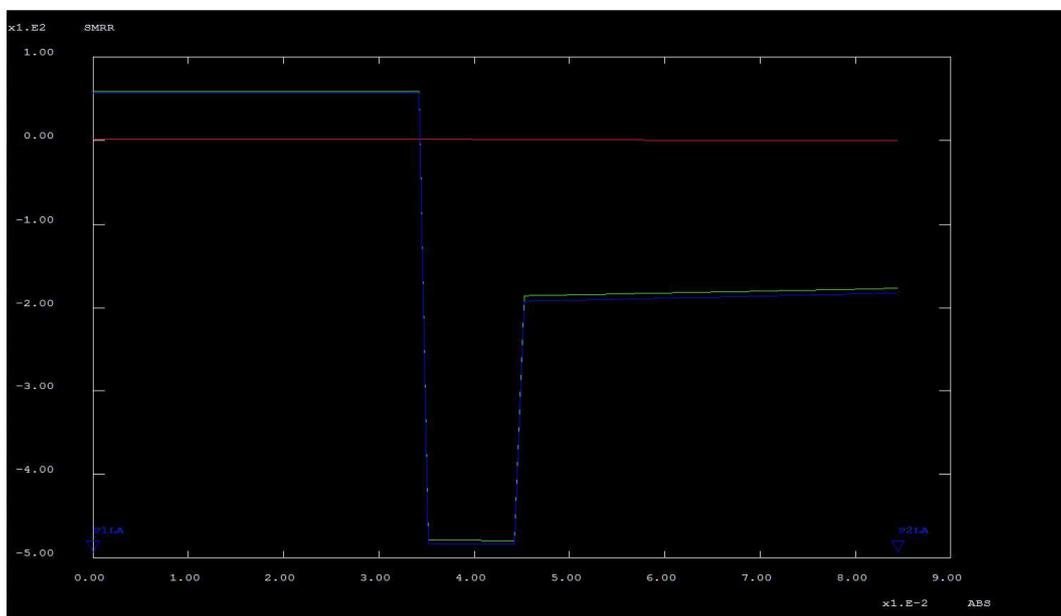


Figura 16 Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato P91 (simulazione P91_10L, rosso RR verde ZZ blu TT).

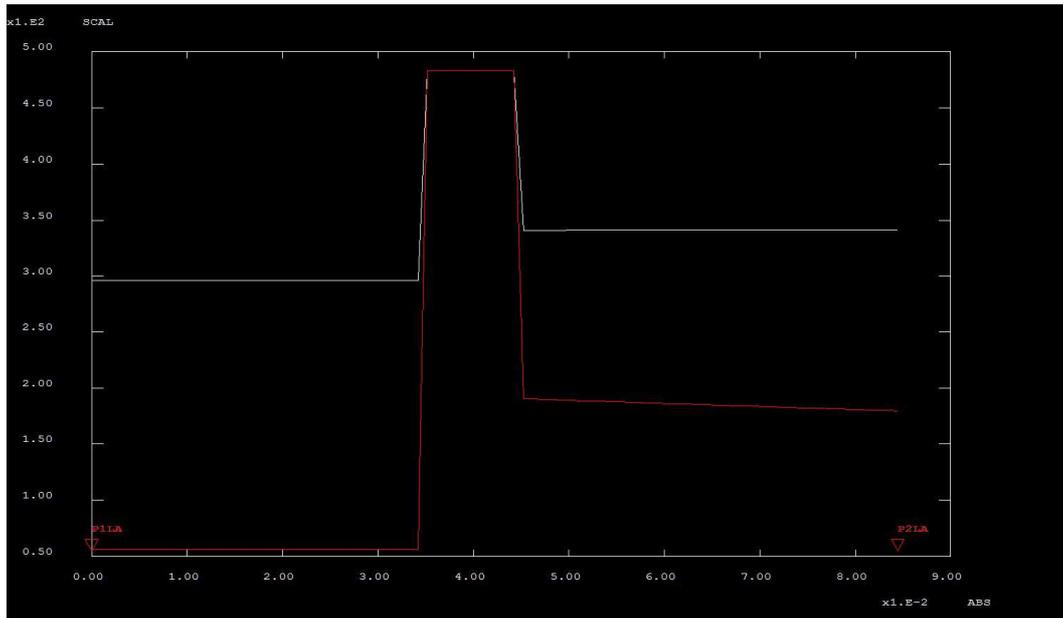


Figura 17 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato P91 (simulazione P91_10L). In bianco la tensione di snervamento.

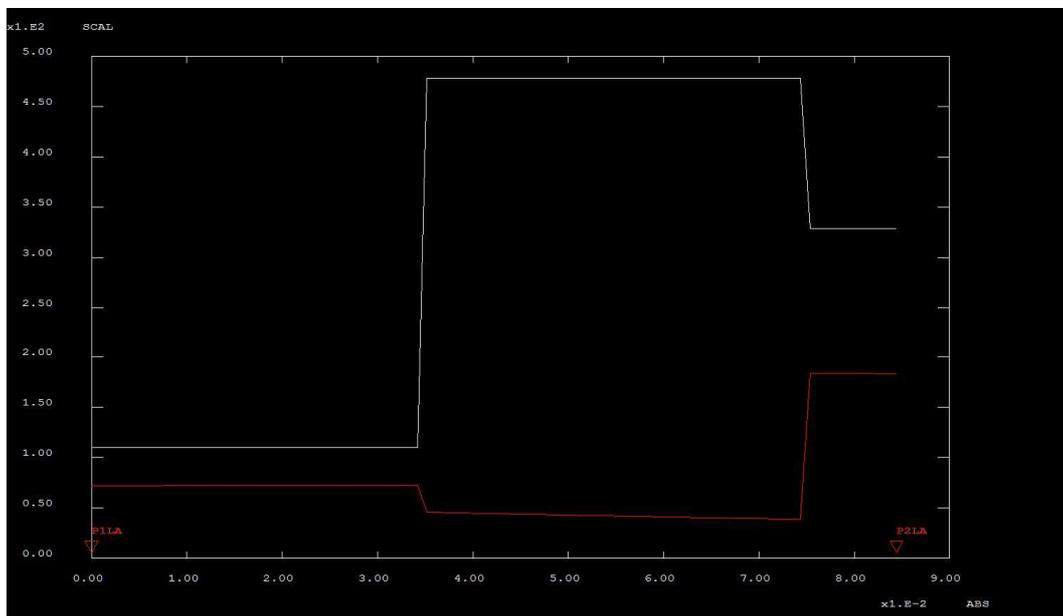


Figura 18 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato ss316 (simulazione SS316_40L). In bianco la tensione di snervamento.

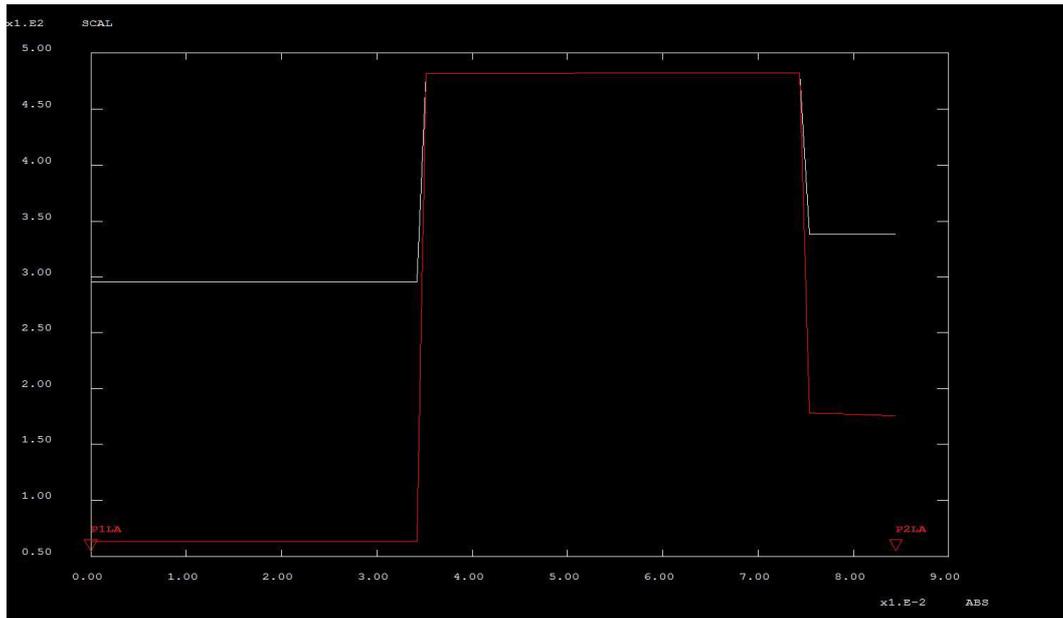


Figura 19 Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) dopo il transitorio termico post deposizione lungo una linea di appoggio per il substrato P91(simulazione P91_40L). In bianco la tensione di snervamento.

6.2 Caso della superficie ondulata

Rispetto al caso di substrato perfettamente liscio, in cui come visto il campo di tensioni giace su piani paralleli al piano tangente alla superficie esterna del substrato, la presenza di rilievi superficiali produce una redistribuzione delle tensioni in cui il campo di tensioni risultante ha componenti radiale RR e di taglio RZ diverse da zero in prossimità delle superficie di separazione fra gli strati e fra coating e substrato.

6.2.1 Calcolo delle tensioni residue

Le figure 20-24 mostrano le mappe delle componenti del campo di tensione e la tensione equivalente di Von Mises per il calcolo delle tensioni residue nella simulazione 316_10R . A seguire le figure da 25 a 28 mostrano l'andamento delle componenti lungo due linee di appoggio passanti una per una cresta ed una per un seno del profilo di separazione fra interfaccia e substrato.

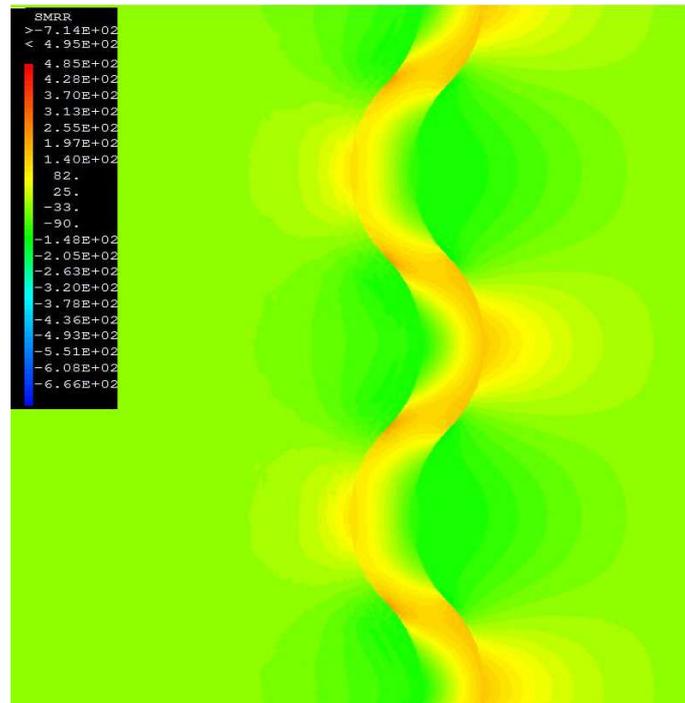


Figura 20 Mappa della componente radiale del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

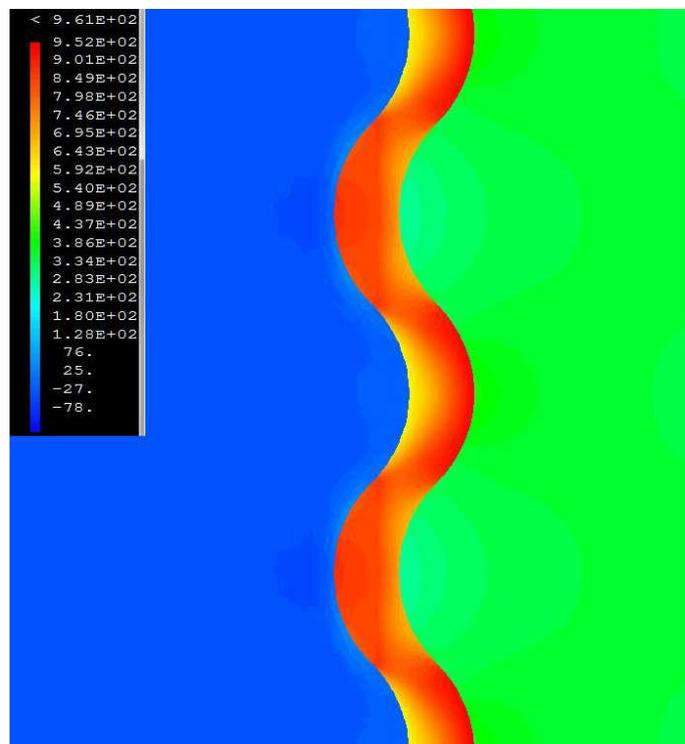


Figura 21 Mappa della componente tangenziale del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

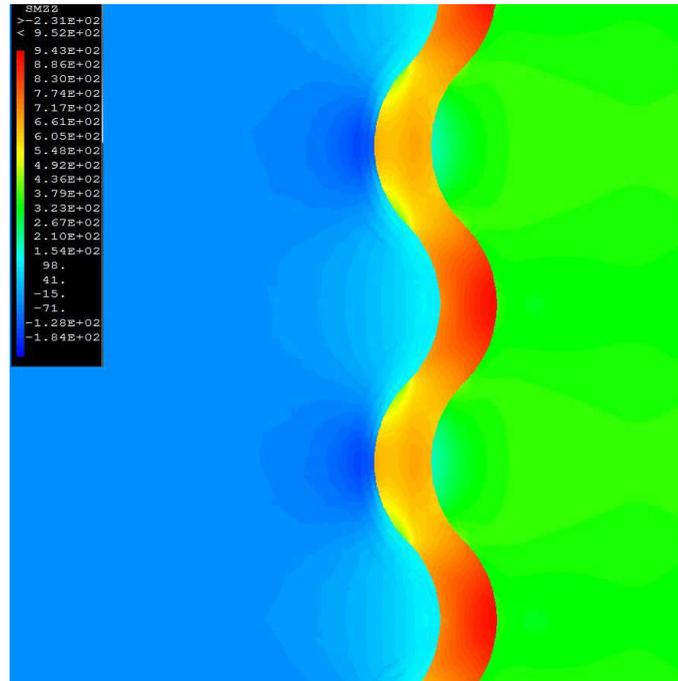


Figura 22 Mappa della componente assiale del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

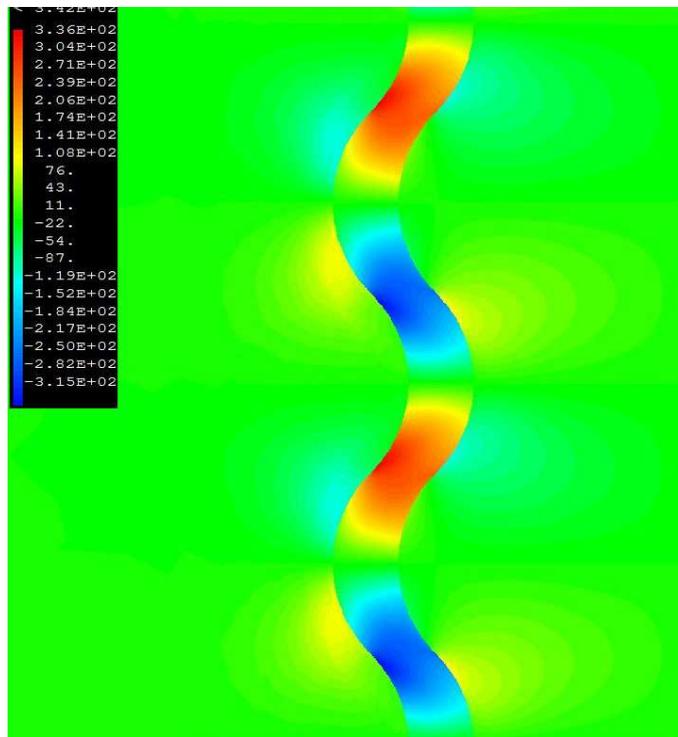


Figura 23 Mappa della componente di taglio RZ del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

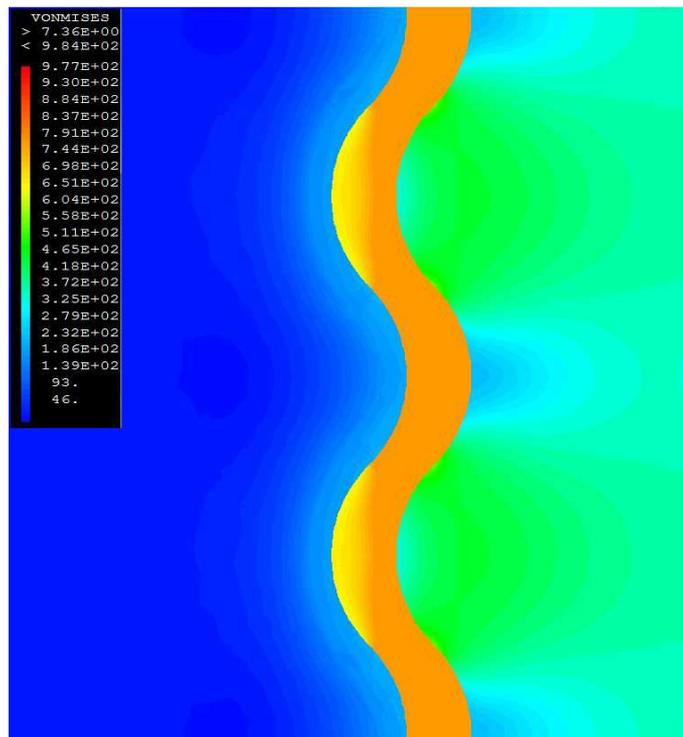


Figura 24 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

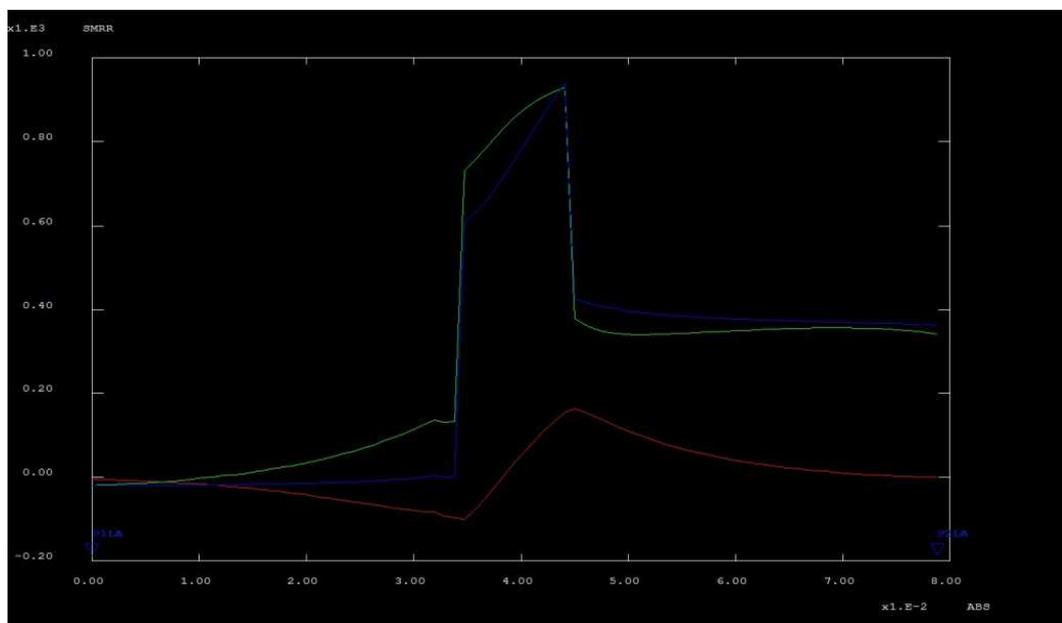


Figura 25 Simulazione 316_10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

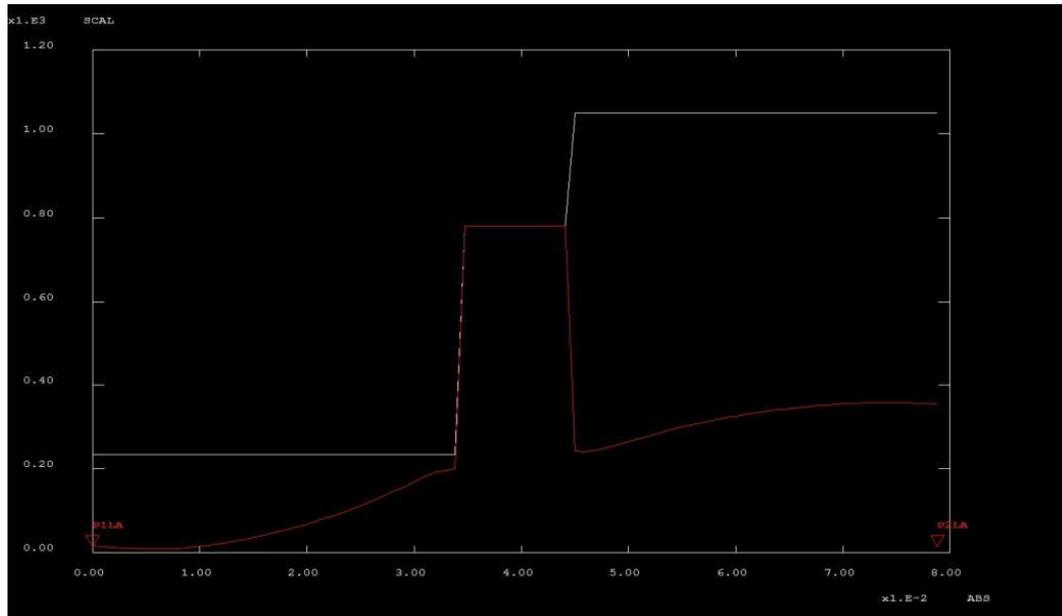


Figura 26 Simulazione 316 _10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sulla cresta. . In bianco la tensione di snervamento.

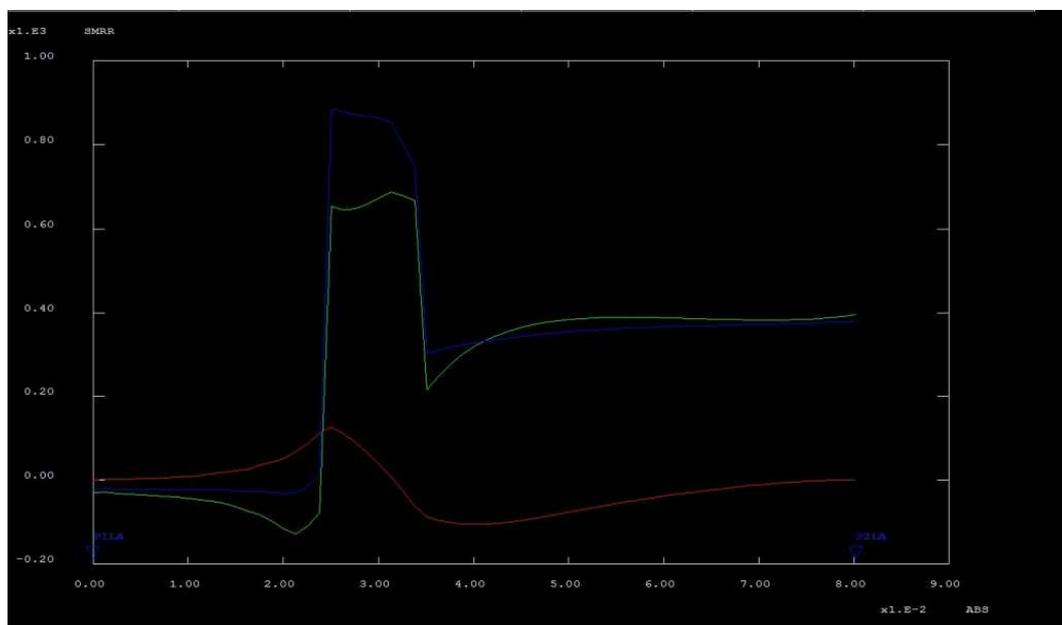


Figura 27 Simulazione 316 _10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

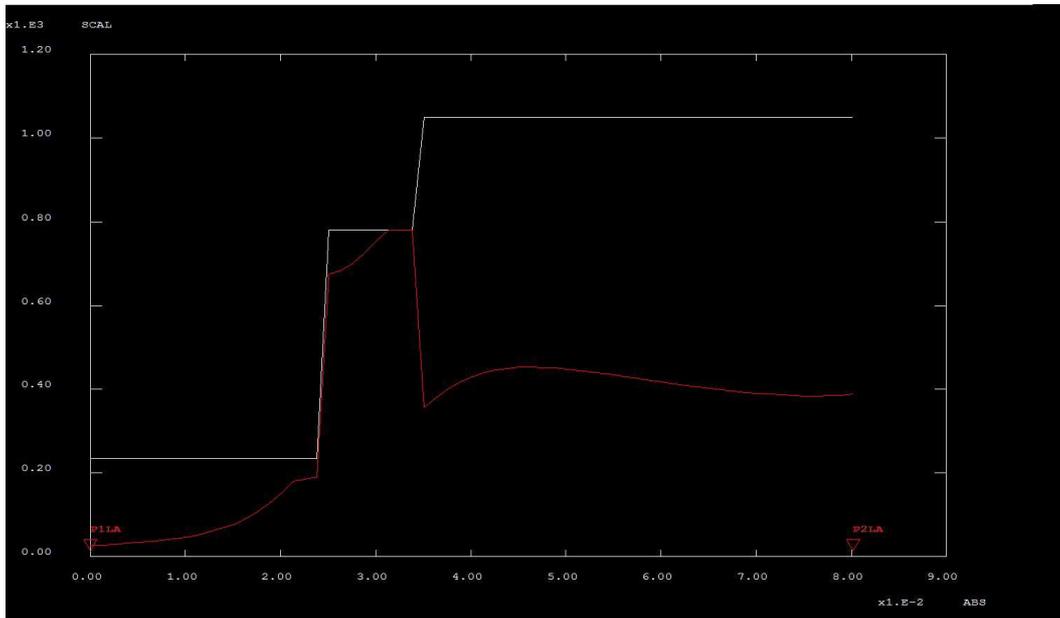


Figura 28 Simulazione 316_10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

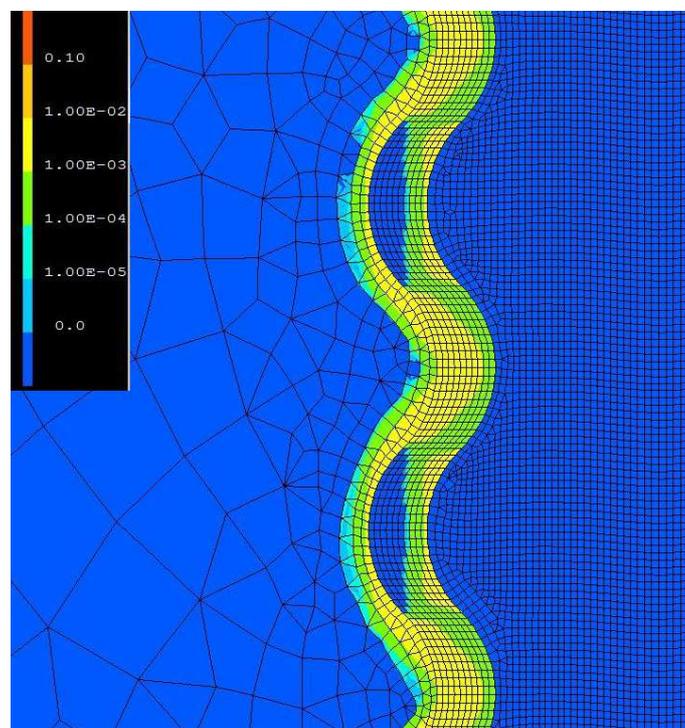


Figura 29 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni residue per la simulazione 316_10R.

Come si può vedere nelle figure precedenti, la rugosità superficiale produce una modulazione periodica del campo di tensioni con la periodicità del profilo. Inoltre la componente radiale, nulla nel caso di interfacce lisce, ha valori in tensione fino a circa 200 MPa in una fascia che corre internamente allo strato di interfaccia all'interno nelle insenature lato substrato ed all'esterno nelle creste mentre nel bordo con lo strato esterno delle insenature e lato interno delle creste ci sono delle regioni in compressione con valori fino a circa -140 MPa. Anche la componente di taglio RZ ha valori non nulli con massimi intorno ai 350 MPa in valore assoluto nelle regioni dello strato di interfaccia dove cambia la curvatura della linea di separazione fra gli strati e nulla nelle creste e nelle insenature. Il segno della componente RZ è alternato rispetto alle creste ed i seni.

La tensione equivalente di Von Mises (figg. 24, 26, 28) ha valori pari alla tensione di snervamento in gran parte dell'interfaccia tranne che nelle zone in prossimità dei seni dove ha valore intorno ai 700 MPa. Nello strato esterno ha valore massimo di circa 450 MPa sulle insenature e di circa 350 MPa sulle creste.

In figura 29 si trova la mappa della deformazione plastica totale da cui si vede che l'interfaccia nella regione interna delle insenature non si deforma plasticamente mentre nella regione esterna delle insenature e nella zona interna delle creste ha valori massimi di deformazione plastica fino a circa 9×10^{-3} rispetto al valore massimo di 1.3×10^{-3} che si ottiene nel caso di substrato liscio. Si osserva inoltre che mentre nel caso di interfacce lisce il substrato non si deforma plasticamente, in presenza di rugosità alla separazione fra gli strati, una fascia di qualche micron prossima alla superficie del substrato in contatto col coating subisce deformazione plastica.

Nel caso di substrato P91 (figg. 30-39) per via della maggiore differenza nel coefficiente di espansione termica il transitorio termico produce tensioni più intense rispetto al caso precedente e la tensione equivalente di Von Mises ha valori pari alla tensione di snervamento in tutto lo spessore del coating. Dal confronto coi risultati relativi alla simulazione col substrato SS316 si trova che le componenti assiale e di hoop hanno valori più elevati mentre le tensioni radiali mostrano andamenti simili ma con valori leggermente inferiori. Risultano inoltre inferiori rispetto al caso di substrato SS316 i valori di picco della componente di taglio con valori di circa ± 250 MPa che interessano però zone più ampie adiacenti lo strato di interfaccia nel substrato e nello strato esterno.

La deformazione plastica totale (fig. 39) mostra che tutto il coating si è deformato plasticamente ed i valori massimi in prossimità della cresta sono di 2×10^{-2} rispetto ai 7.7×10^{-3} trovato per il substrato liscio. Come nel caso di substrato SS316 la superficie esterna del substrato si deforma plasticamente ma in misura minore sia per estensione che per intensità.

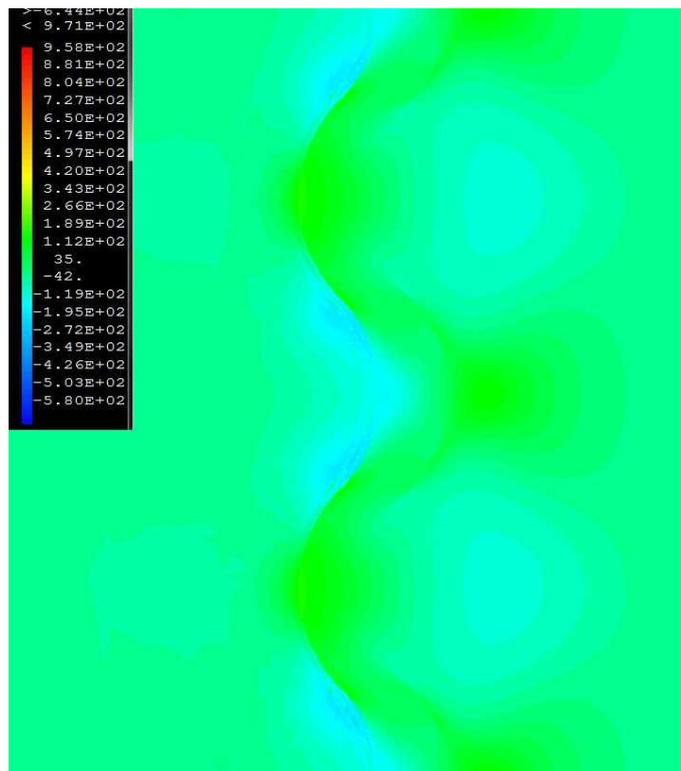


Figura 30 Mappa della componente radiale del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R.

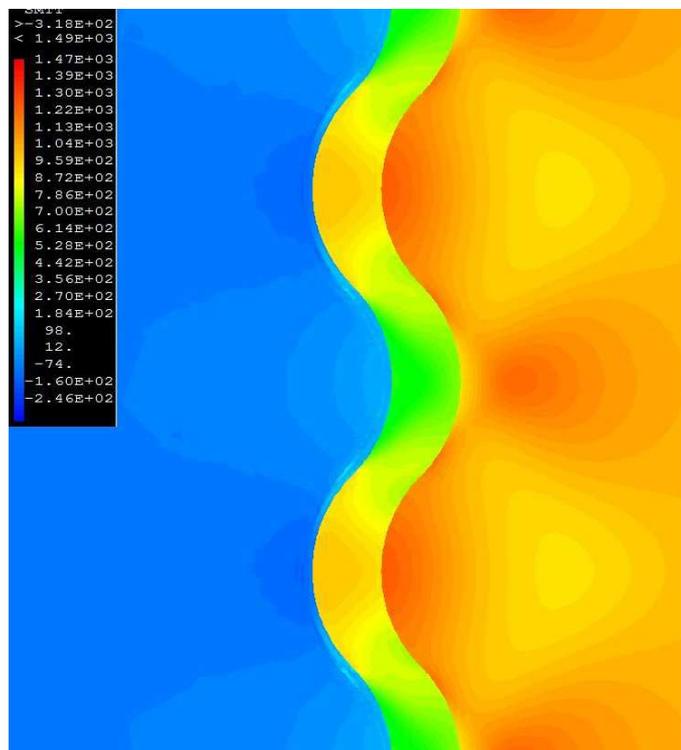


Figura 31 21 Mappa della componente tangenziale del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R.

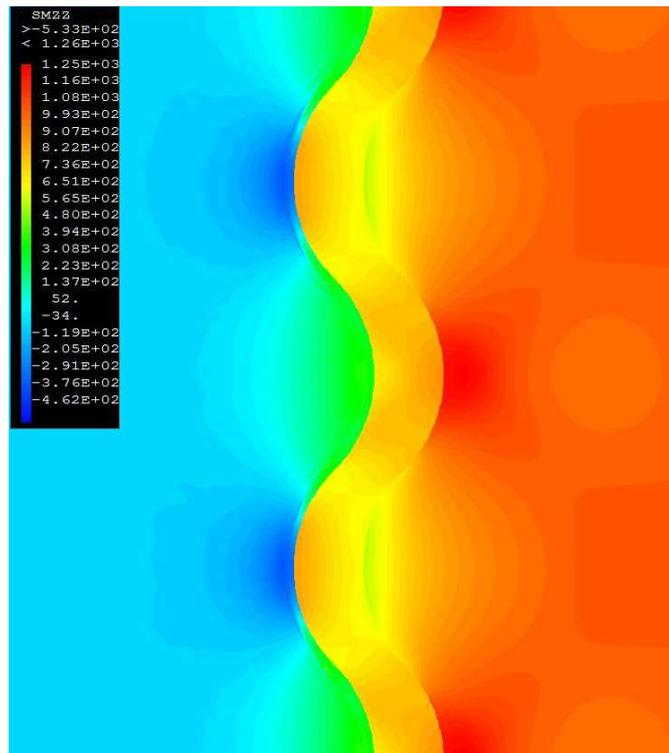


Figura 32 Mappa della componente assiale del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R.

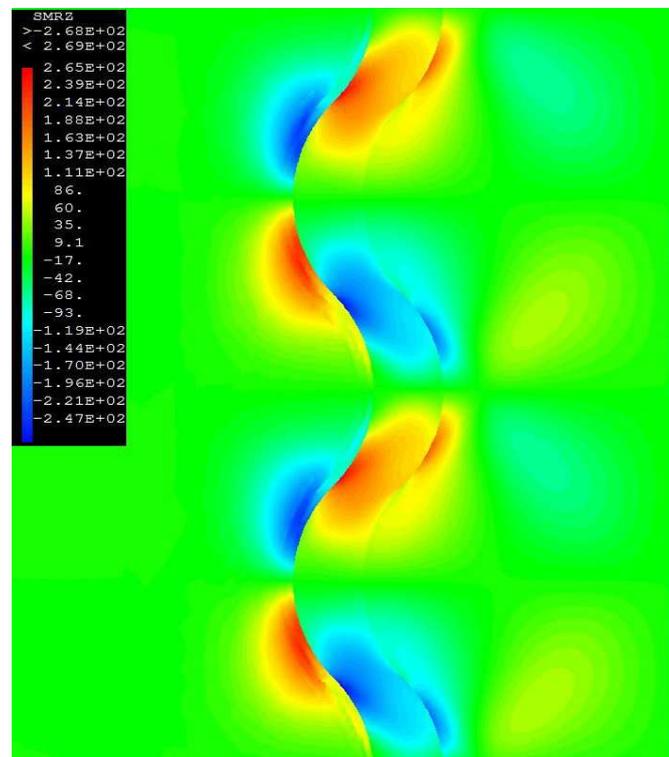


Figura 33 Mappa della componente di taglio RZ del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R.

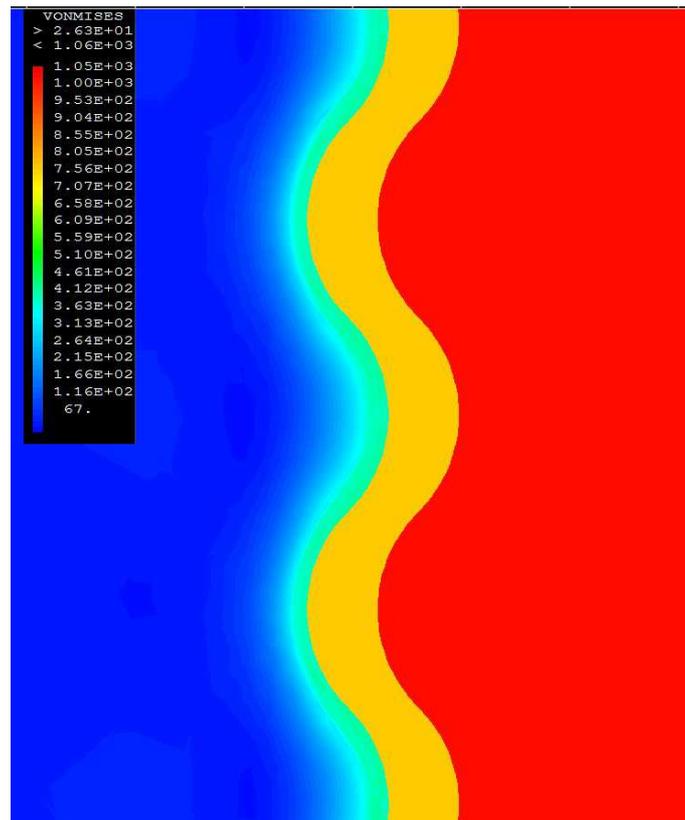


Figura 34 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R.

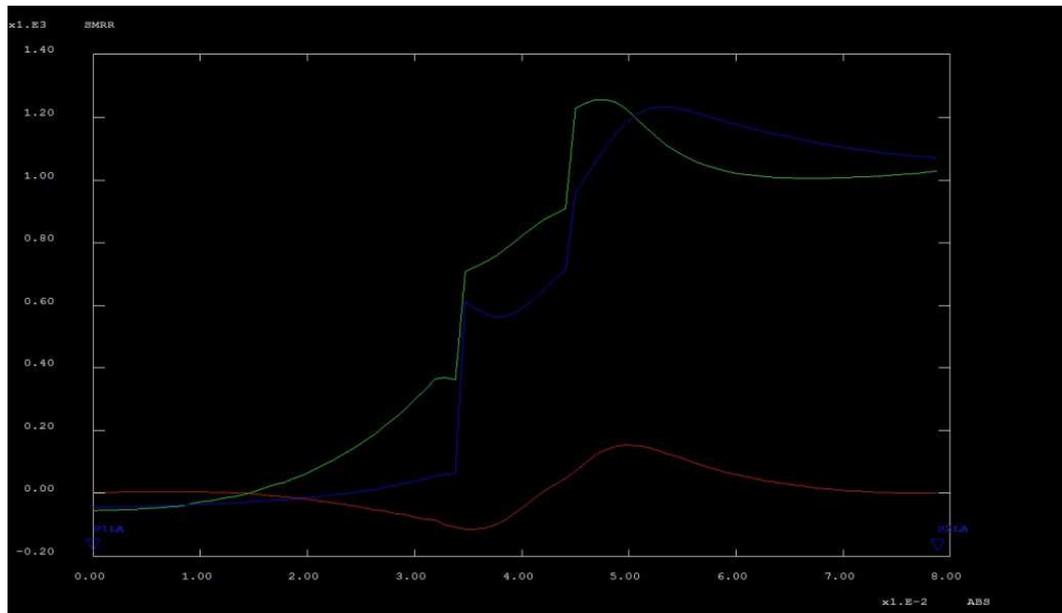


Figura 35 Simulazione P91_10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

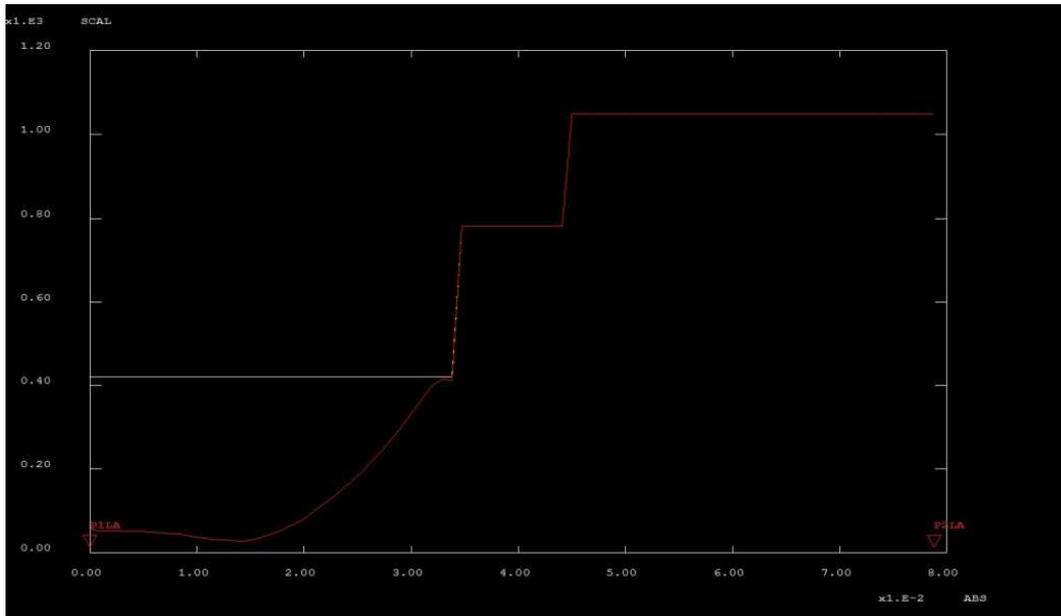


Figura 36 Simulazione P91 _10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

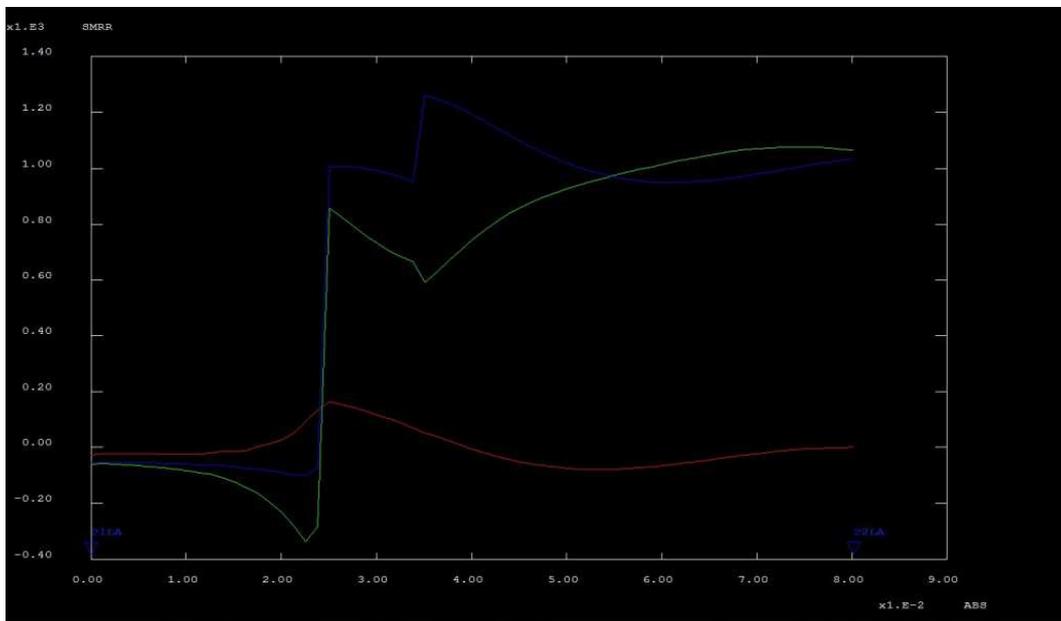


Figura 37 Simulazione P91 _10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

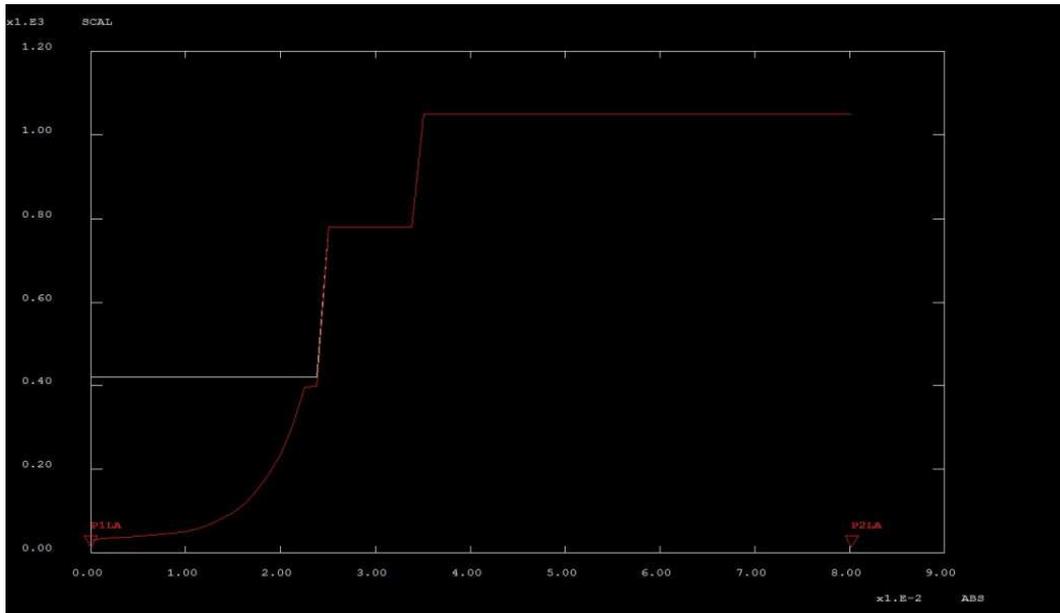


Figura 38 Simulazione P91_10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

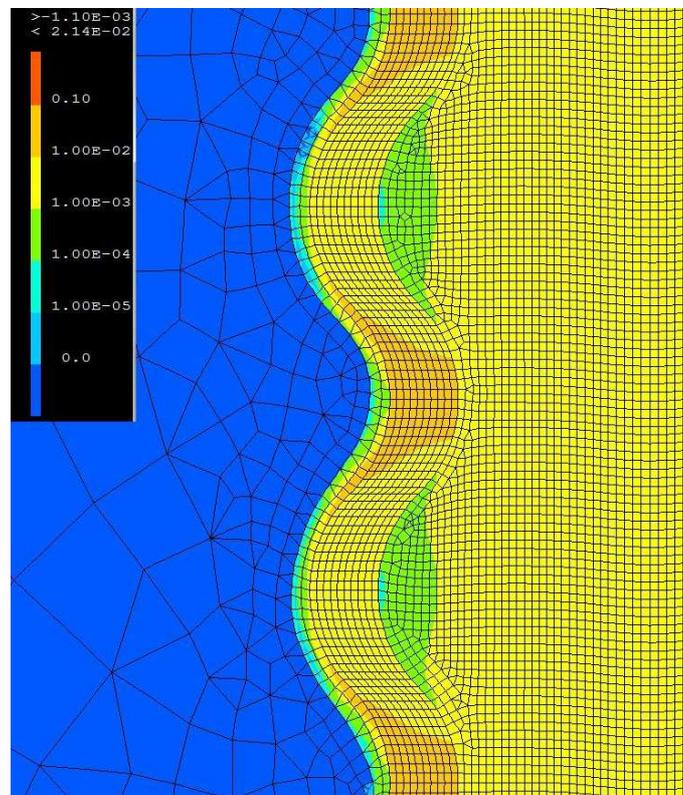


Figura 39 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni residue per la simulazione P91_10R

6.2.2 Calcolo delle tensioni residue: Influenza dello spessore

Aumentando lo spessore dell'interfaccia da 10 a 40 micron nel caso di substrato SS316 (figg. 40-43) le tensioni sulle linee di separazione hanno valori molto simili a quelli trovati nel caso di interfaccia spessa 10 micron a meno di qualche MPa. Dalla figure 35-37 si vede che il valore della tensione equivalente di Von Mises nello strato di interfaccia è pari alla tensione di snervamento ovunque tranne che nella zona dei seni lato substrato ed in una regione prossima alle creste lato esterno, in corrispondenza di zone che non subiscono deformazione plastica (vedi fig. 43).

Dal confronto fra la figura 43 e la figura 29 relative alla deformazione plastica totale si vede che all'aumentare dello spessore del substrato si allarga la regione non deformata nella zona dei seni e compare una regione non deformata nella zona delle creste nel lato esterno dell'interfaccia. E' importante notare inoltre che aumentando lo spessore dell'interfaccia aumenta sensibilmente, fino ad una decina di micron, la regione di substrato che si deforma plasticamente.

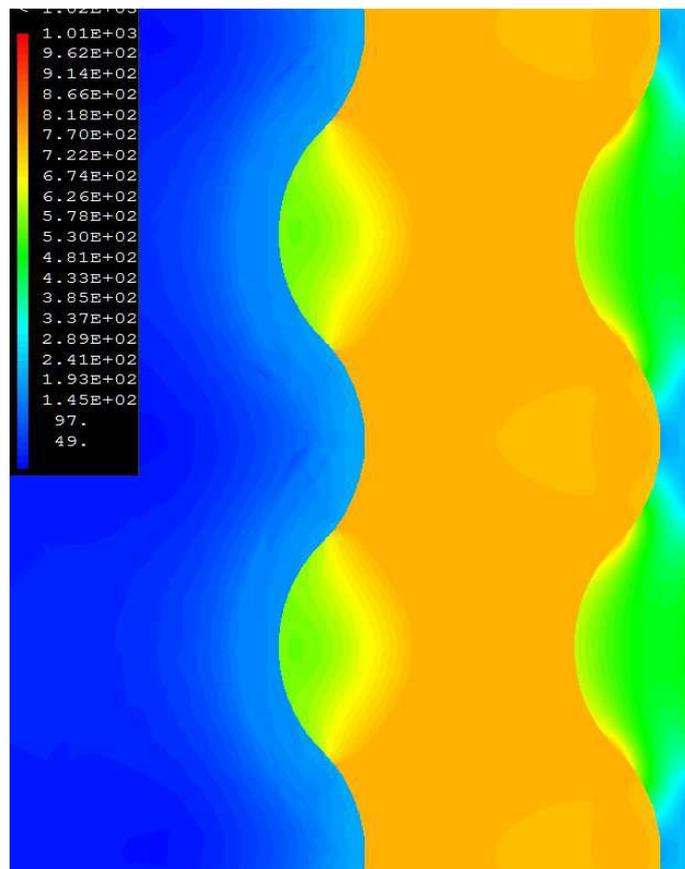


Figura 40 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni residue per la simulazione 316_40R.

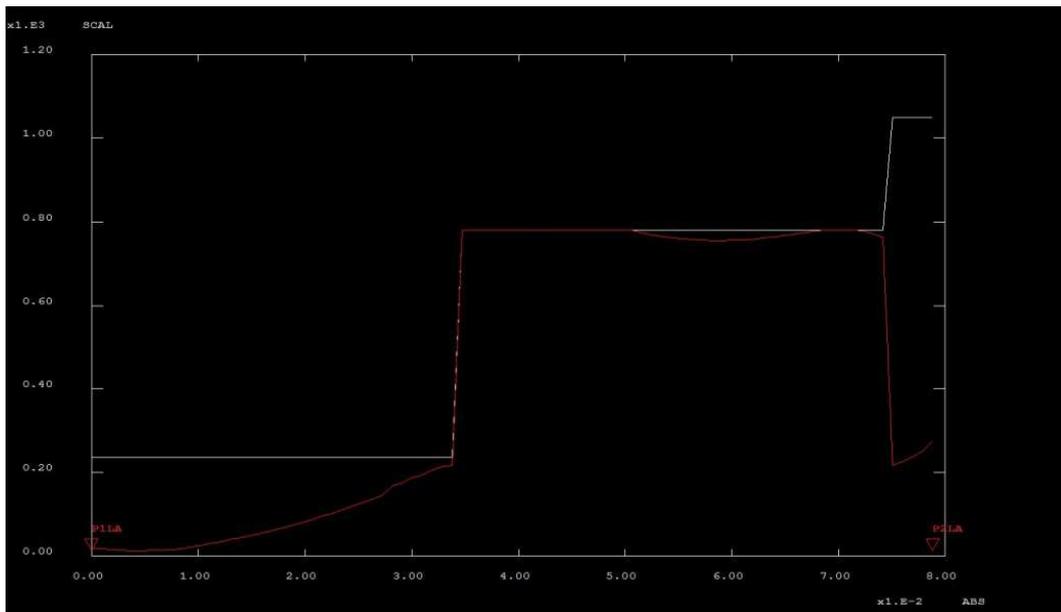


Figura 41 Simulazione 316_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

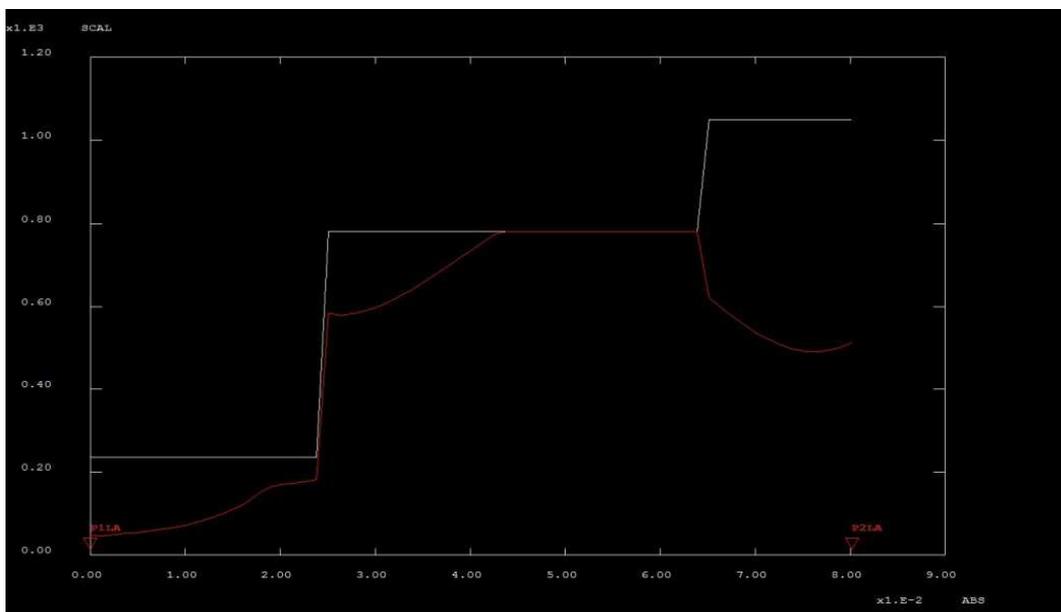


Figura 42 Simulazione 316_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni residue lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

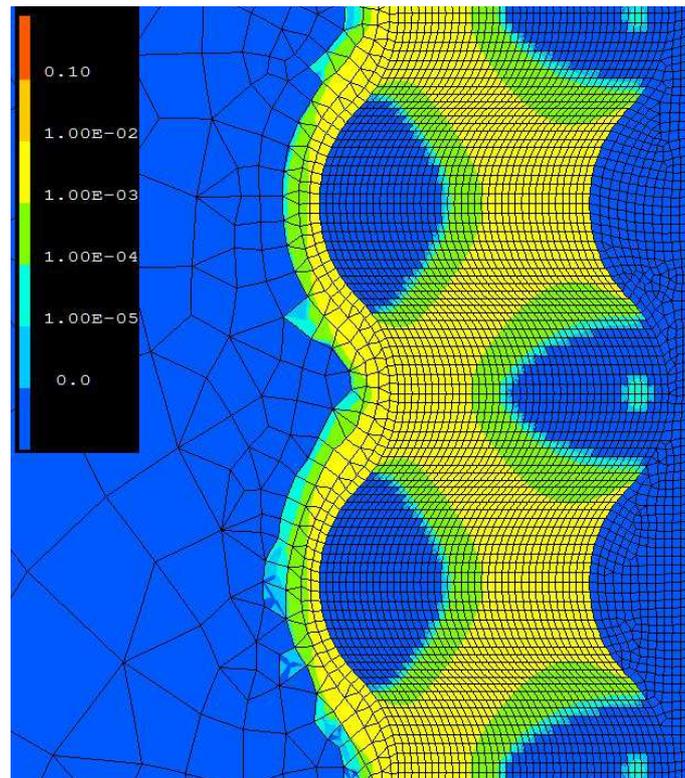


Figura 43 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni residue per la simulazione 316 _40R

Nel caso di substrato P91 (figure da 44 a 46), dal confronto con le figure 30 e 44 relative alla componente radiale del campo di tensioni nei due spessori si vede che la regione in compressione nella zona delle creste prossima alla superficie esterna del substrato è più estesa con valori più intensi intorno a -250 MPa all'aumentare dello spessore dell'interfaccia da 10 a 40 μm . Come nei casi precedenti la tensione equivalente di Von Mises è pari alla tensione di snervamento in tutto il coating. Vale lo stesso discorso per la deformazione plastica totale e dal confronto fra le figure 42 e 34 si vede che le zone con deformazione plastica massima dell'ordine di 10^{-2} nella zona interna delle creste nell'interfaccia rimane pressoché invariata, aumenta la deformazione plastica in alcune zone prossime ai seni lato esterno dell'interfaccia ed aumenta la deformazione plastica nel substrato seppure con valori minimi nella zona delle creste.

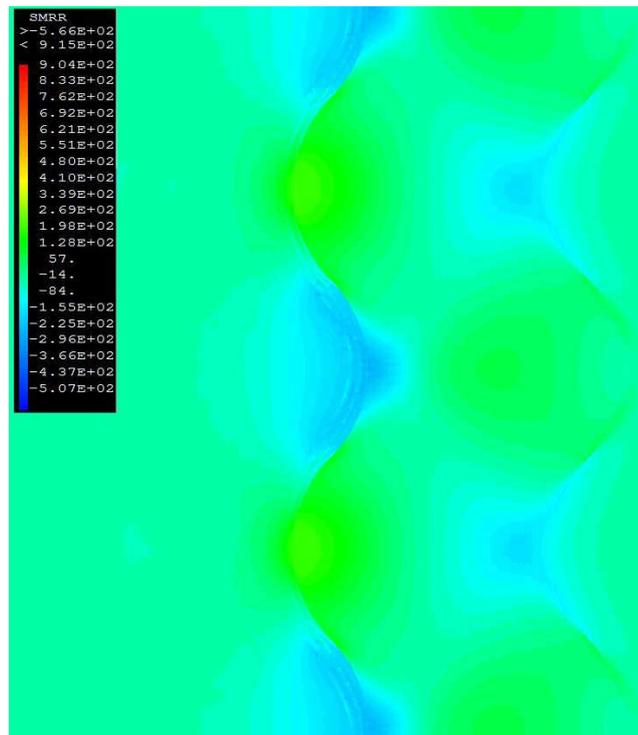


Figura 44 Mappa della componente radiale del campo di tensioni residue per la simulazione P91_40R.

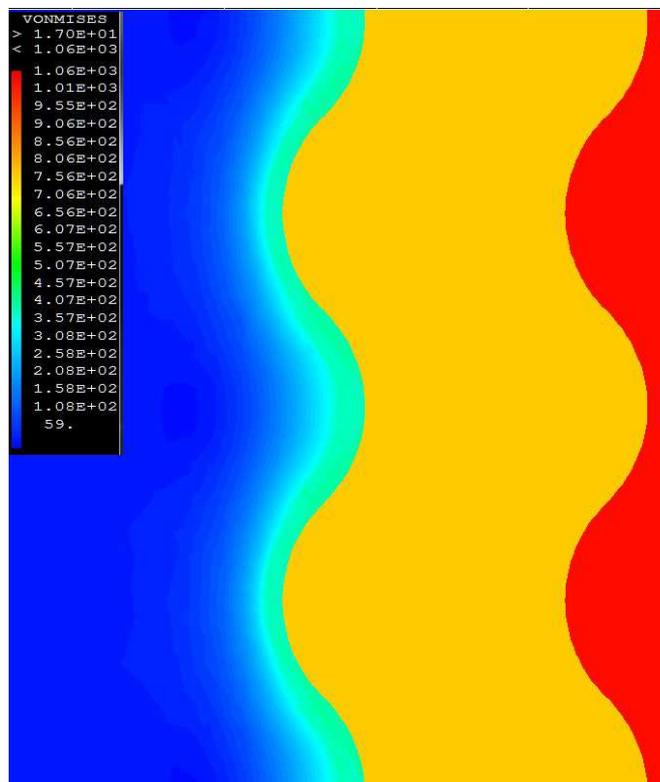


Figura 45 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni residue per la simulazione P91_40R.

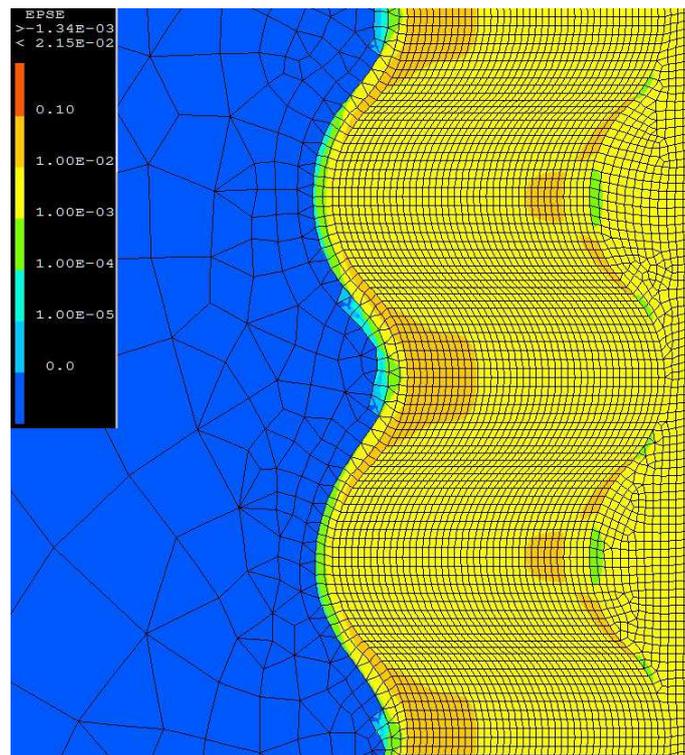


Figura 46 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni residue per la simulazione P91 _40R

6.2.3 Transitorio termico post deposizione

In figura 47-55 e 56-64 ci sono le mappe e gli andamenti lungo le linee di appoggio del campo di tensioni per i due substrati, SS316 e P91 rispettivamente .

Riguardo alla componente radiale in entrambi i casi nello strato di interfaccia si alternano regioni in tensione in prossimità delle creste e regioni in compressione in prossimità delle insenature. Nel caso del substrato SS316 il valore massimo in tensione ha valori intorno ai 50 MPa mentre per il P91 è più elevato con valori di circa 80 MPa. Il picco in compressione ha valore minimo di circa -60 MPa nel caso di substrato SS316 e -120 MPa nel caso di P91.

La componente di taglio anche in questo caso ha valori non nulli dove il profilo delle superfici di separazione cambia concavità. Dal confronto con la mappa della componente di taglio ottenuta per il calcolo delle tensioni residue si vede che la distribuzione è simile ma i segni sono invertiti essendo nel complesso il coating in compressione. Valori sono compresi fra i +100 e -100 MPa per il ss316 e +200 e -200 MPa circa per il P91.

Le altre componenti nello strato di interfaccia hanno valori in compressione per entrambi i substrati, mentre lo strato esterno è in tensione per il substrato SS316 ed in compressione per il substrato P91. Nel caso di substrato SS316 (figg. 52, 53), rispetto al valore di -50 MPa nello strato di interfaccia e +180 MPa nello strato esterno trovati nella analoga simulazione su provino con superficie liscia, sulle creste si trova un valore di picco di -200 MPa nell'interfaccia, alla superficie di separazione col substrato, mentre lo strato esterno è in

tensione con massimi a 300 MPa per la componente assiale e 200 MPa per la componente di hoop alla superficie di separazione con l'interfaccia.

Nella regione dei seni si trova un valore di picco di -180 MPa per la componente assiale e di -100 MPa per la componente di hoop alla superficie di separazione fra interfaccia e strato esterno; lo strato esterno è in tensione con valori crescenti fino al bordo esterno intorno a 170 MPa. Dalle figura 51 54,55 che mostrano la mappa della tensione equivalente di Von Mises e gli andamenti lungo le linee di appoggio e la figura 15, relativa all'analogia simulazione relativa al caso della superficie liscia, si trovano sulle insenature valori simili mentre sulle creste la tensione equivalente è maggiore con dei picchi in corrispondenza delle superficie di separazione di circa 200 MPa. Nella regione delle insenature è il substrato a trovarsi alla tensione di snervamento in una regione larga una decina di micron. Dalle mappe della deformazione plastica totale (figg. 65) si trova infatti che il substrato SS316 si è deformato plasticamente su una regione piuttosto estesa su tutta la superficie esterna con valori intorno a 10^{-3} mentre lo strato esterno ed alcune regioni dell'interfaccia non si sono deformate plasticamente.

Nel caso del substrato P91, rispetto al valore di -480 MPa nello strato di interfaccia e -190 MPa nello strato esterno trovati nella analogia simulazione su provino con superficie liscia, sulle creste (fig. 61) si trovano valori compresi fra i -400 MPa e -500 MPa nell'interfaccia per le componenti tangenziale ed assiale e lo strato esterno è compressione con valori della componente assiale compresi fra -180 e -230 MPa e la componente tangenziale con valori compresi fra -130 e -200 MPa. Lungo la linea di appoggio sulle insenature le tensioni risultano inferiori rispetto al caso della superficie liscia e (fig. 62) nello strato di interfaccia la componente tangenziale ha valori intorno ai -400 MPa e la assiale cresce in modulo da circa -280 MPa al bordo del substrato a circa -440 MPa al bordo con lo strato esterno. Lo strato esterno è in compressione con valori compresi fra -220 -250 MPa per la componente assiale e la componente tangenziale che da valori prossimo allo zero raggiunge i -300 MPa. Dalla figura 60 che riporta la mappa della tensione equivalente di Von Mises si vede che lo strato di interfaccia ha una tensione equivalente pari alla tensione di snervamento alla temperatura finale (circa 480 MPa) ovunque tranne che nelle zone prossime ai seni. Dal confronto con l'analogia simulazione, dalla figura 63 e 64 e la figura 17 relativa al caso della superficie liscia, che mostrano la tensione equivalente di Von Mises lungo le linea di appoggio, si vede che sulle creste la situazione è simile mentre sulle insenature la tensione equivalente nello strato di interfaccia è inferiore. Dalla mappe della deformazione plastica totale (fig. 66) si trova che la zone delle creste del substrato ha subito una deformazione plastica più intensa con valori dell'ordine di 10^{-3} rispetto al caso di superficie liscia in cui si ottengono valori costanti lungo lo strato dell'ordine dei 10^{-4} . Dalla mappa della deformazione plastica totale si trova inoltre che il substrato nella regione delle creste si è deformato plasticamente in una fascia larga circa un micron. la deformazione plastica del substrato è minima e localizzata dove invece tutto il coating si deforma plasticamente con massimi nella regione delle creste nell'interfaccia con valori dell'ordine di 10^{-3} .

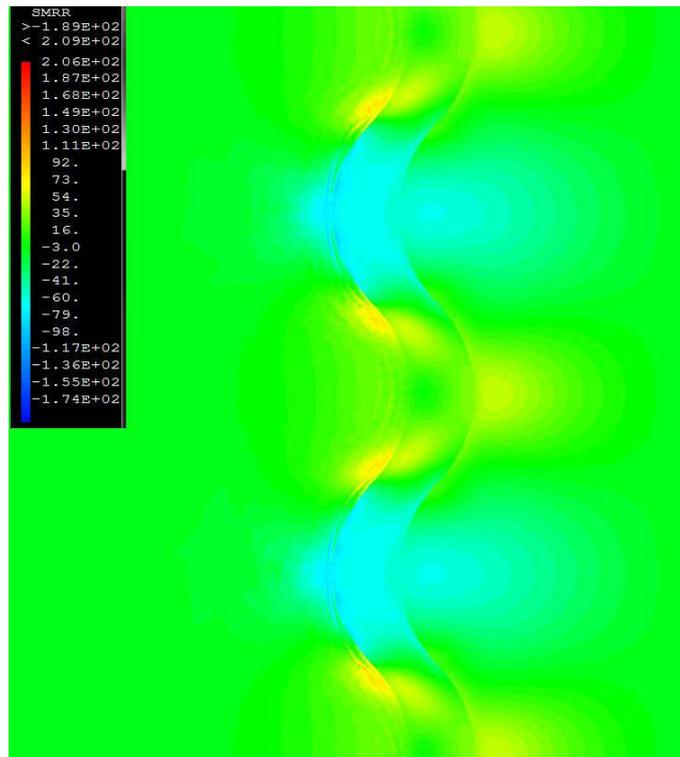


Figura 47 Mappa della componente radiale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R.

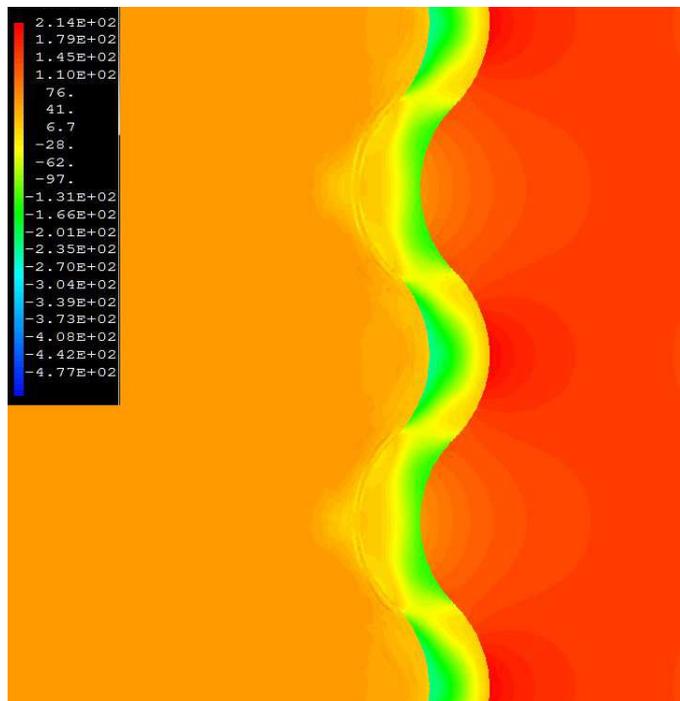


Figura 48 Mappa della componente tangenziale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R.

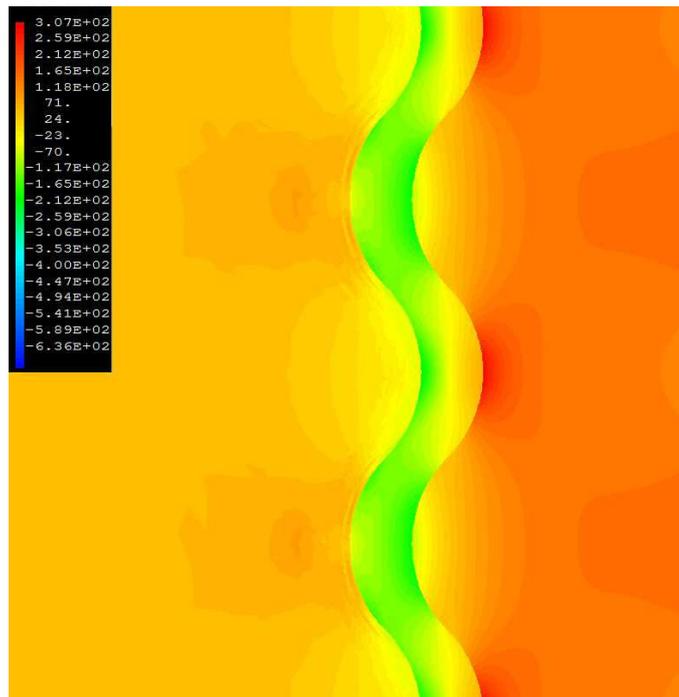


Figura 49 Mappa della componente assiale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R.

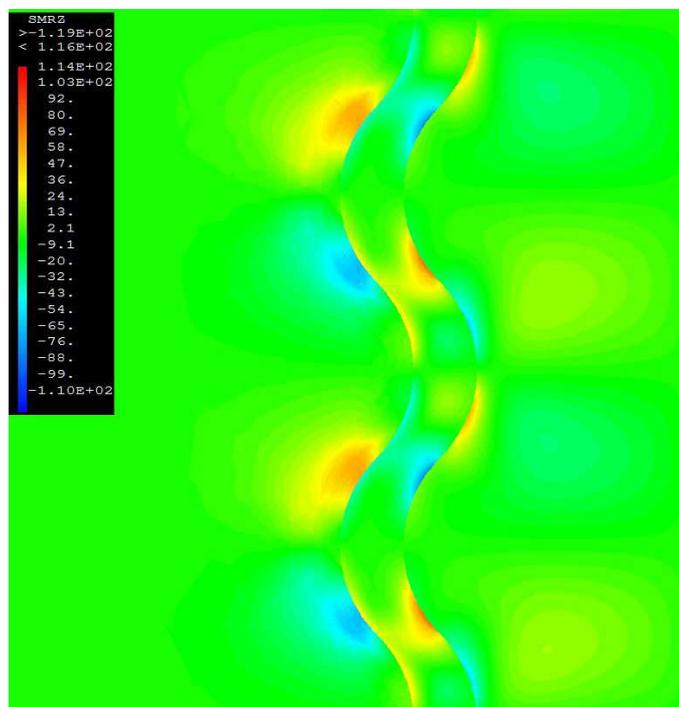


Figura 50 Mappa della componente di taglio RZ del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R.

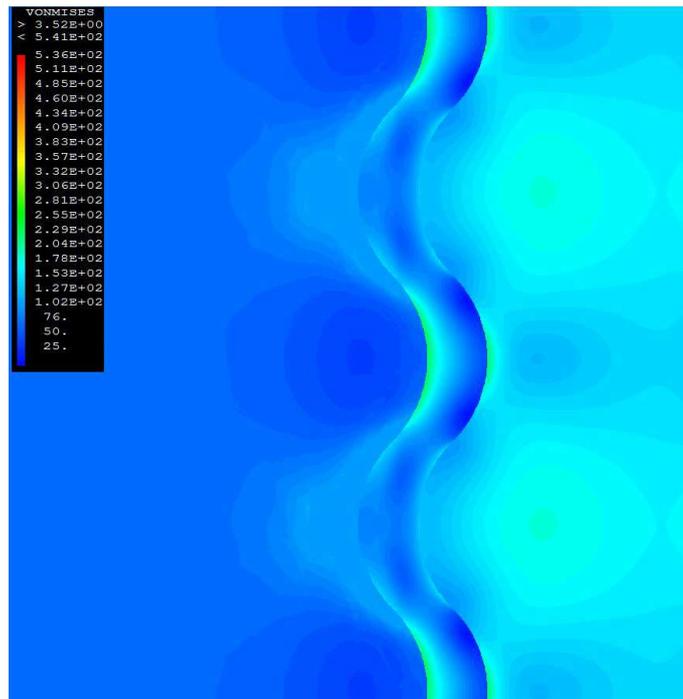


Figura 51 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R.

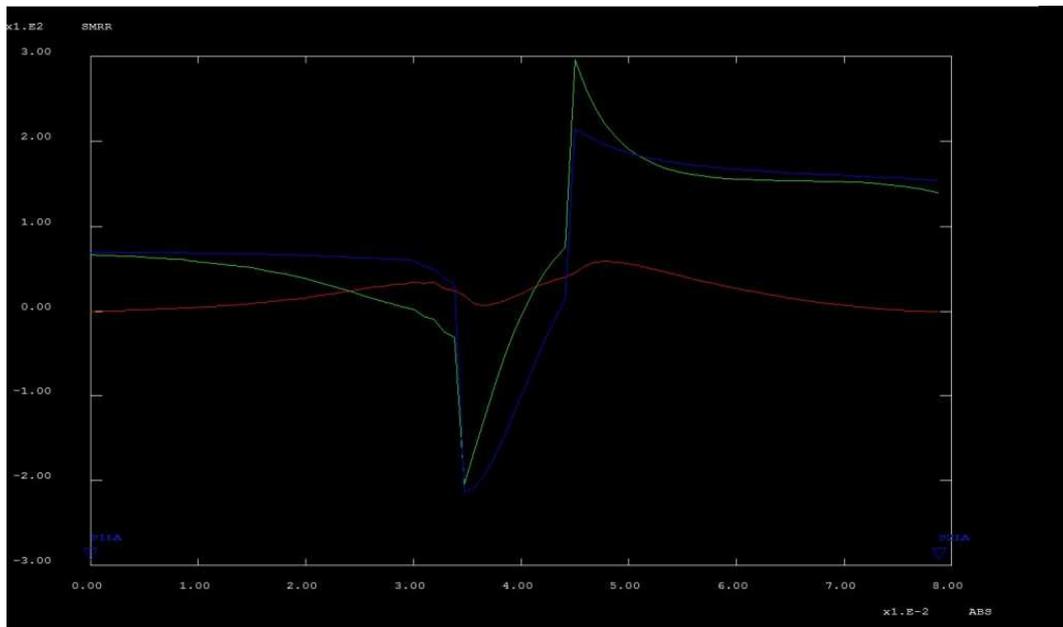


Figura 52 Simulazione 316_10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

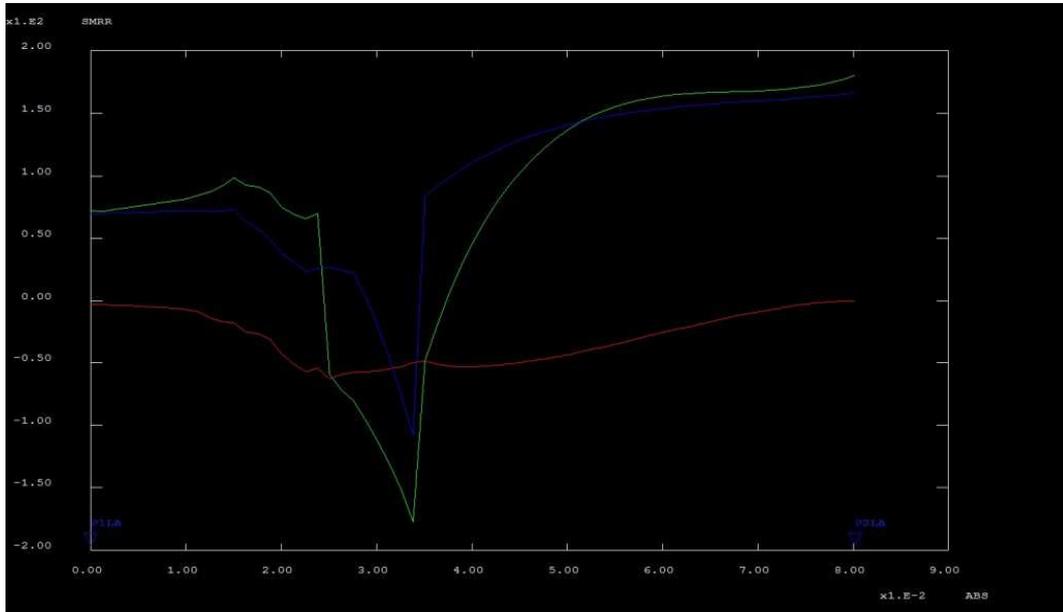


Figura 53 Simulazione 316 _10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

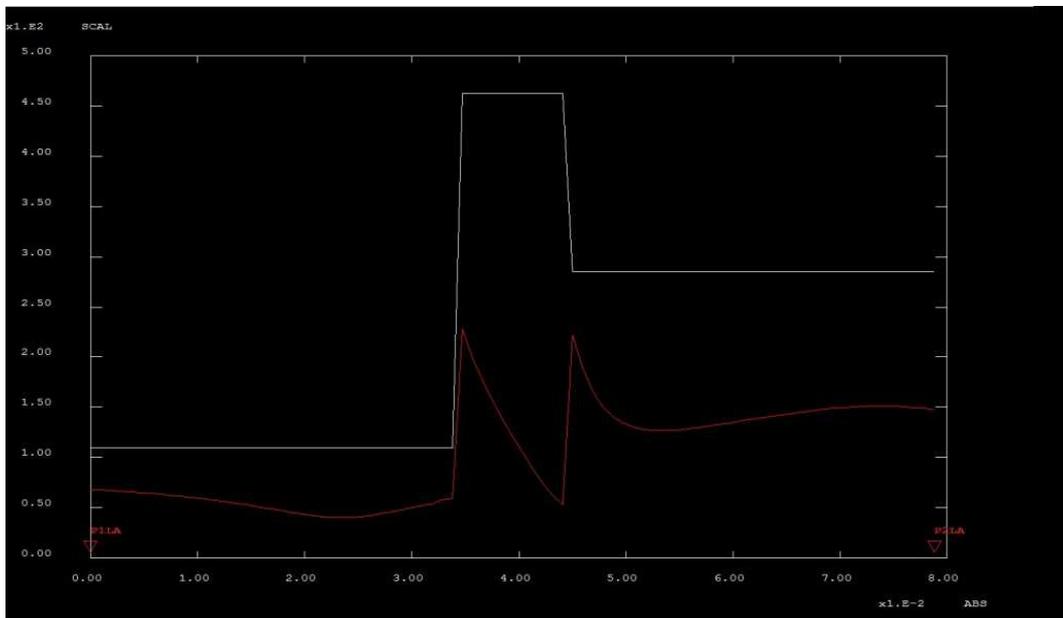


Figura 54 Simulazione 316 _10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

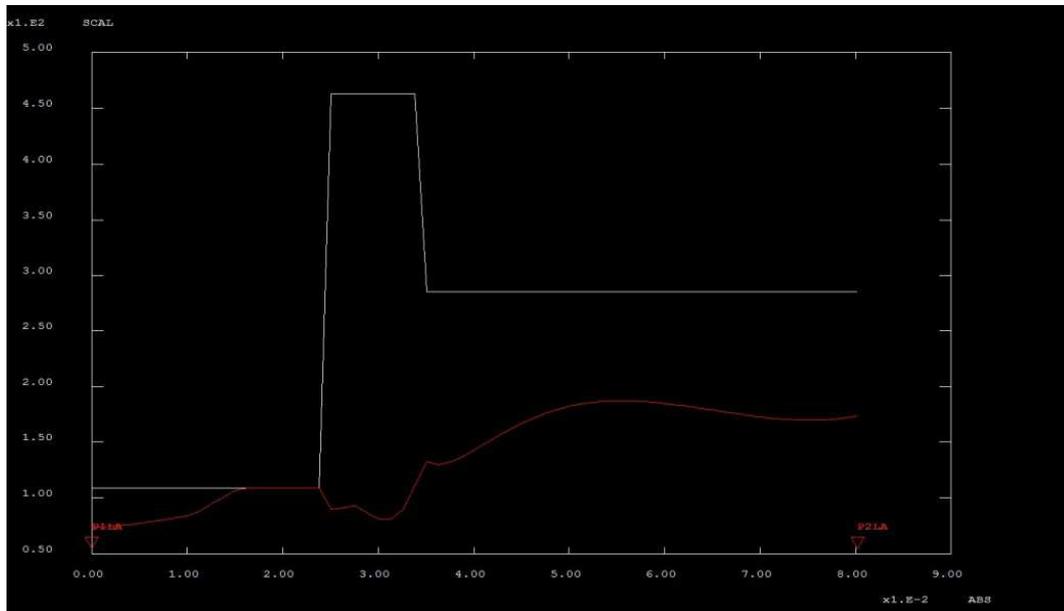


Figura 55 Simulazione 316 _10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

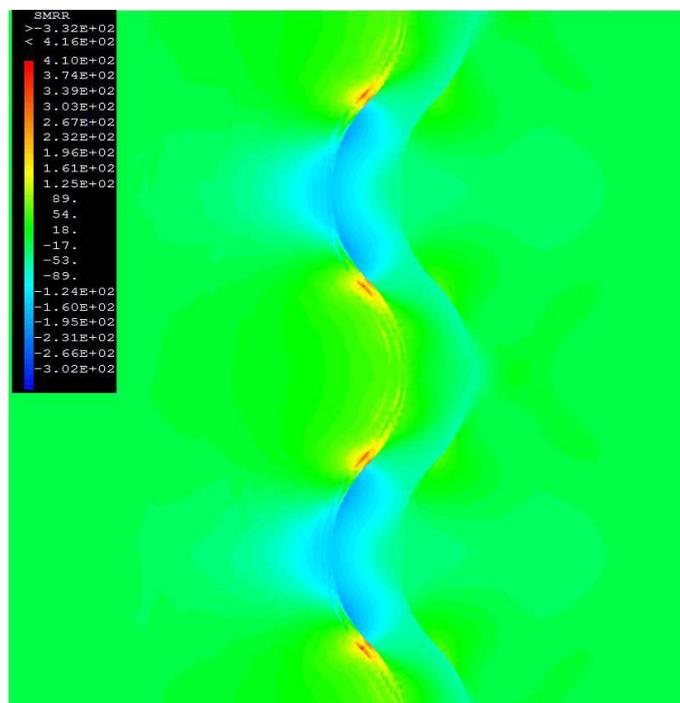


Figura 56 Mappa della componente radiale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91 _10R.

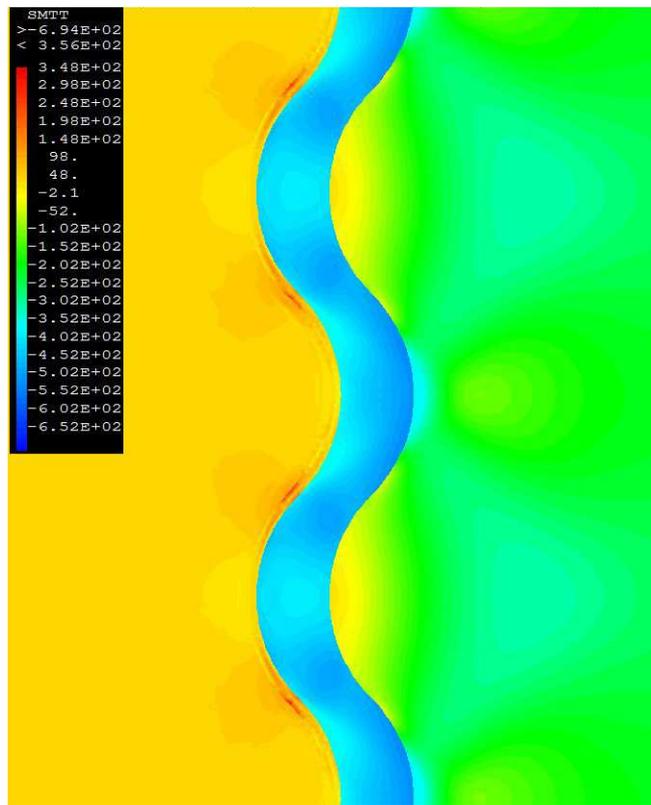


Figura 57 Mappa della componente tangenziale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_10R.

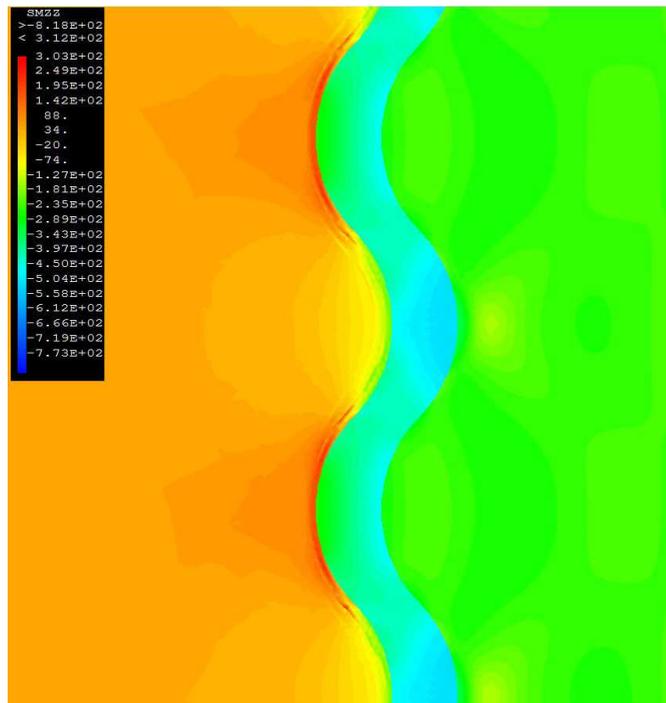


Figura 58 Mappa della componente assiale del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_10R.

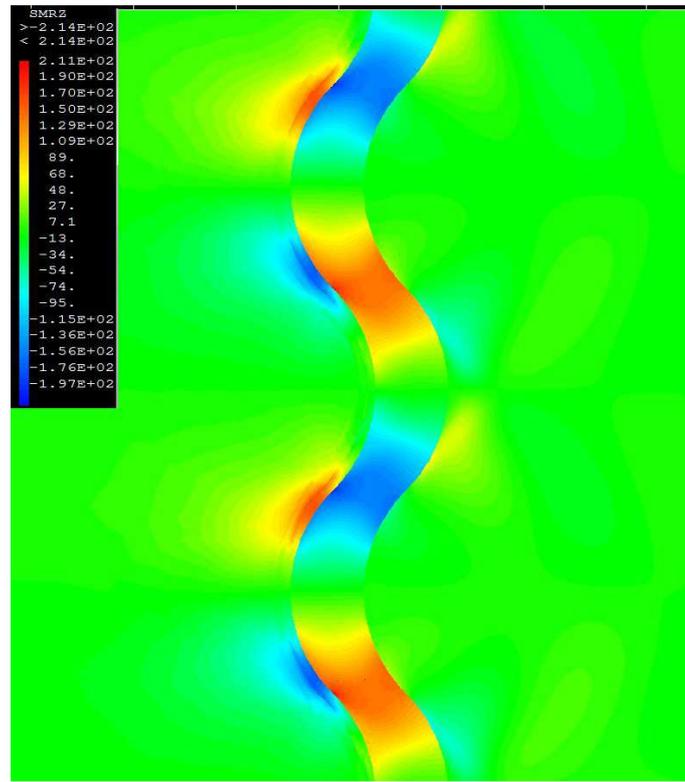


Figura 59 Mappa della componente di taglio RZ del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_10R.

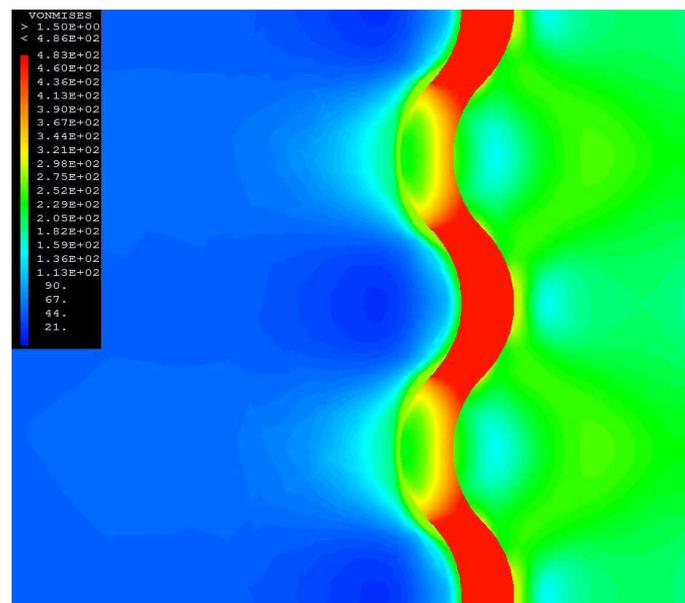


Figura 60 Mappa della tensione equivalente di Von Mises del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_10R

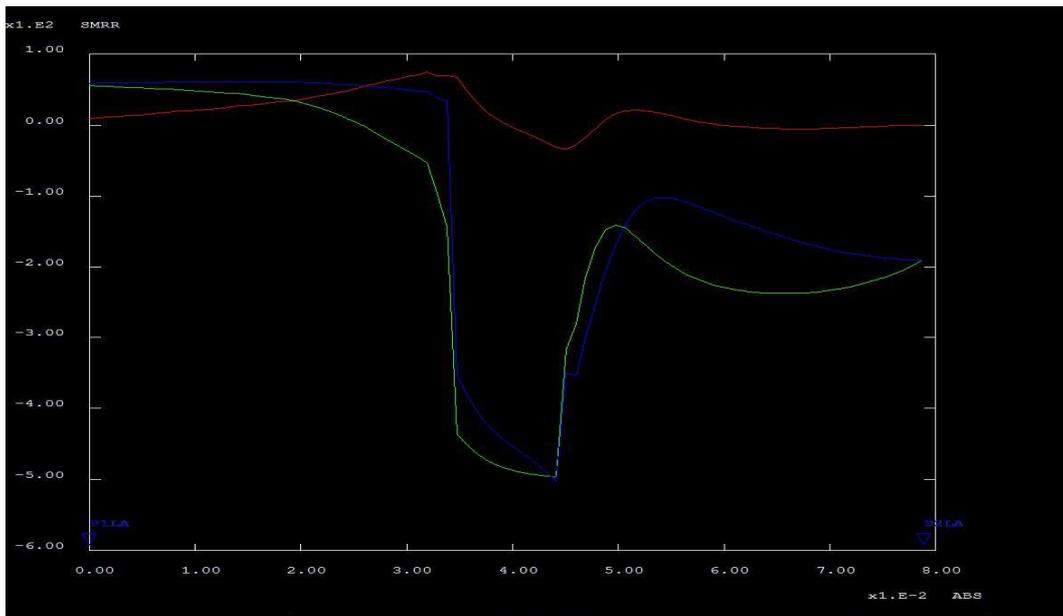


Figura 61 Simulazione P91_10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

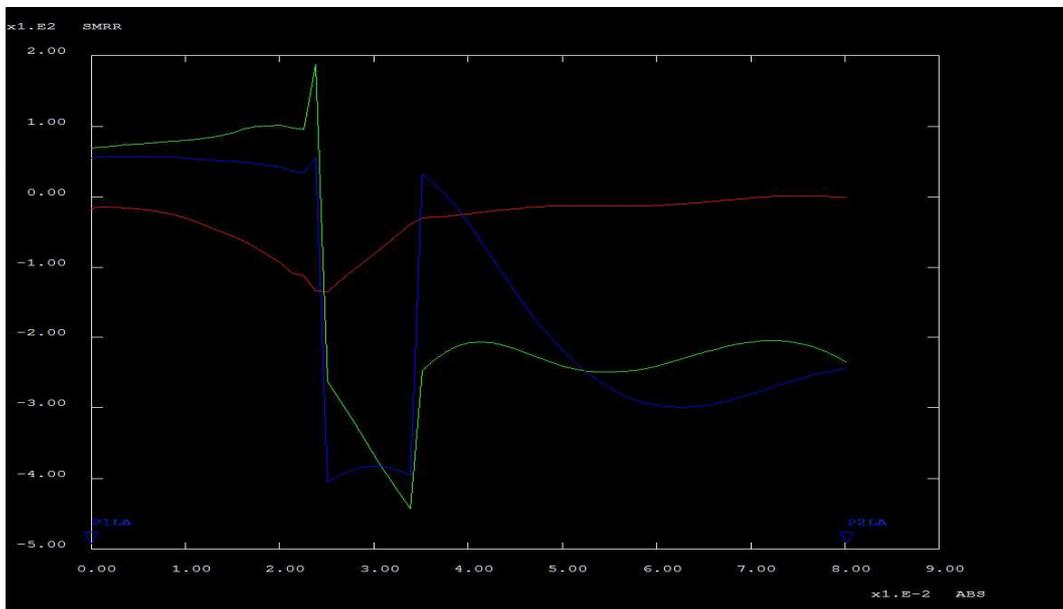


Figura 62 Simulazione P91_10R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

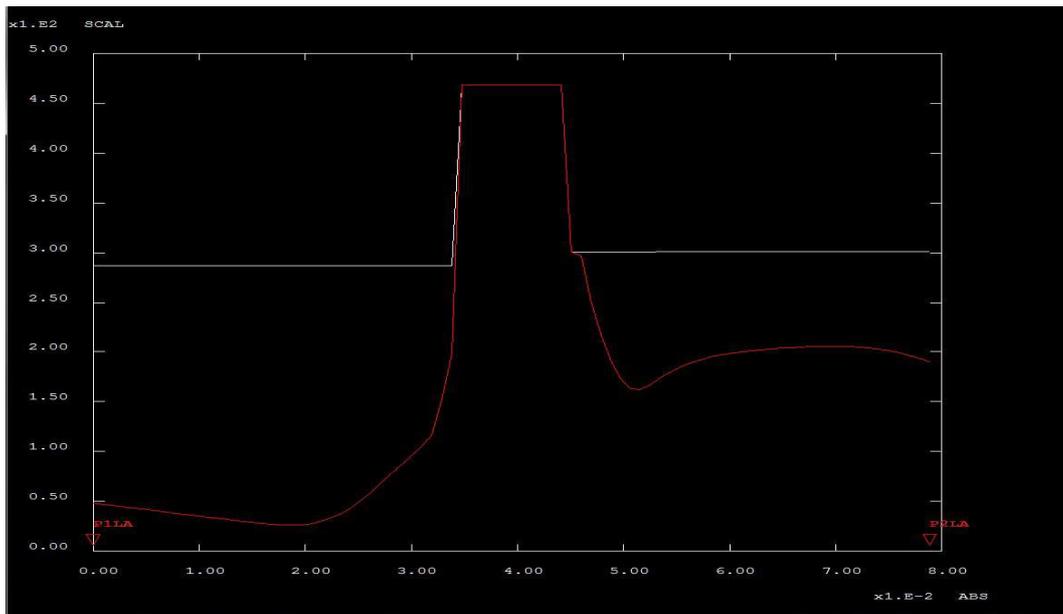


Figura 63 Simulazione P91_10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

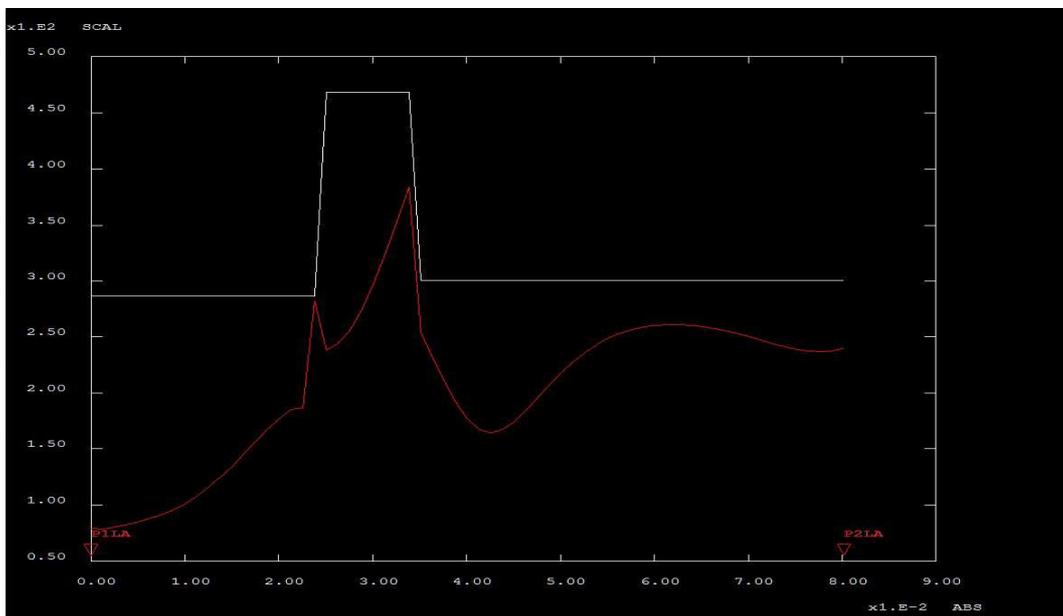


Figura 64 Simulazione P91_10R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

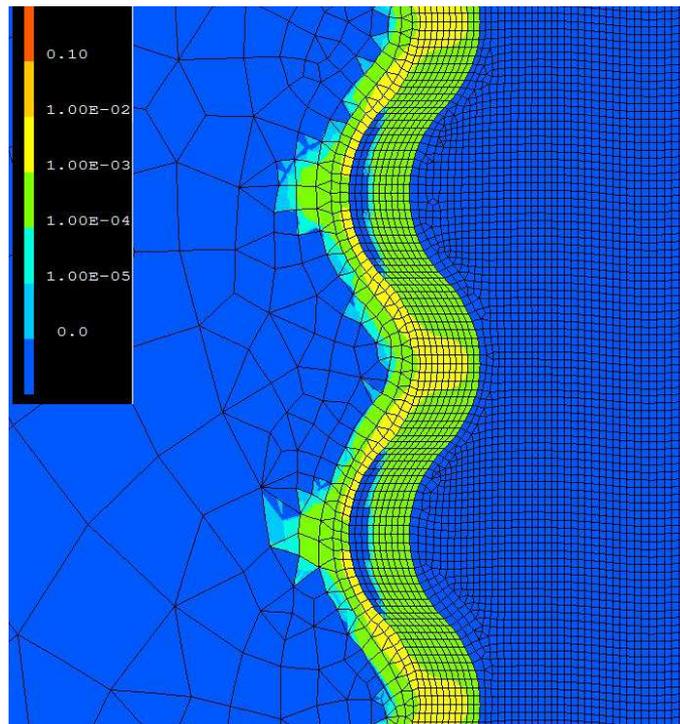


Figura 65 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_10R

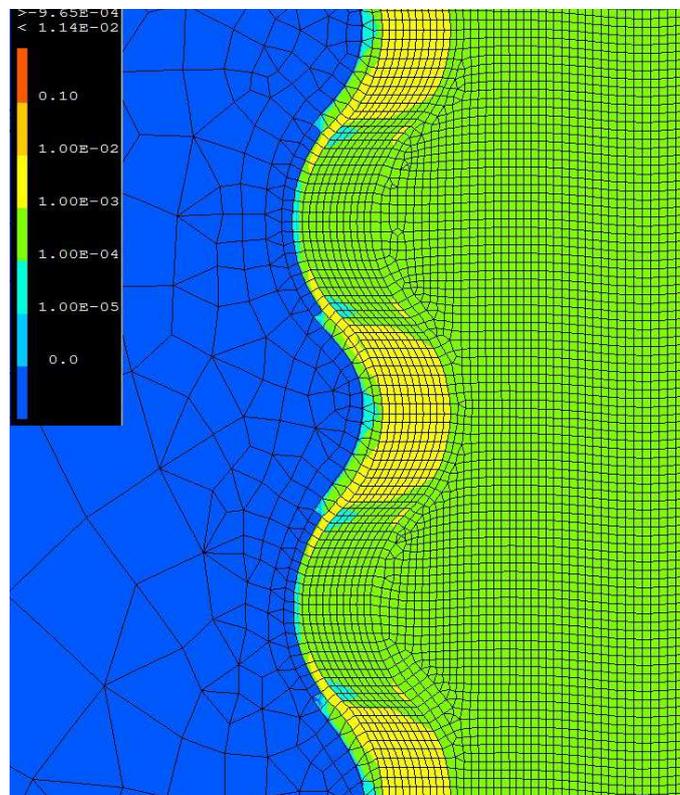


Figura 66 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_10R

6.2.4 Transitorio termico post deposizione: Influenza dello spessore

Nel caso di substrato SS316, aumentando lo spessore dell'interfaccia, da 10 a 40 micron, dal confronto fra i grafici in figg. 52 e 67 relativi alle proiezioni sulle linee di appoggio sulle creste per i due casi, la componente radiale aumenta di intensità in prossimità della superficie del substrato da circa 22 MPa a valori intorno ai 100 MPa. Sulle insenature (figg. 53 e 68) ha andamento simile in compressione in prossimità della separazione del coating col substrato mentre compare un picco in tensione di circa 40 MPa alla separazione fra strato di interfaccia e strato esterno. Le altre componenti del campo di tensione hanno valori di picco in compressione che crescono con lo spessore alla separazione col substrato e passano da circa -200MPa a circa -300 MPa nelle creste, mentre hanno valori comparabili nella regione dei seni. Un discorso simile vale per la tensione equivalente di Von Mises (figg. 54 e 55 per il provino con interfaccia spessa 10 micron e figg. 69 e 70 per il provino con interfaccia spessa 40 micron) e dal confronto dei grafici relativi ai due spessori si trovano valori molto simili nella regione delle creste mentre nella regione delle insenature il picco alla separazione fra coating e substrato cresce da circa 210 MPa a circa 400 MPa aumentando lo spessore del substrato. E' importante notare inoltre che aumenta lo spessore della regione di substrato che si trova alla tensione di snervamento. Dalle mappe della deformazione plastica totale relative ai due spessori (figg.65 e 71) si vede che all'aumentare dello spessore cresce sensibilmente in volume ed intensità la regione di substrato che si deforma plasticamente.

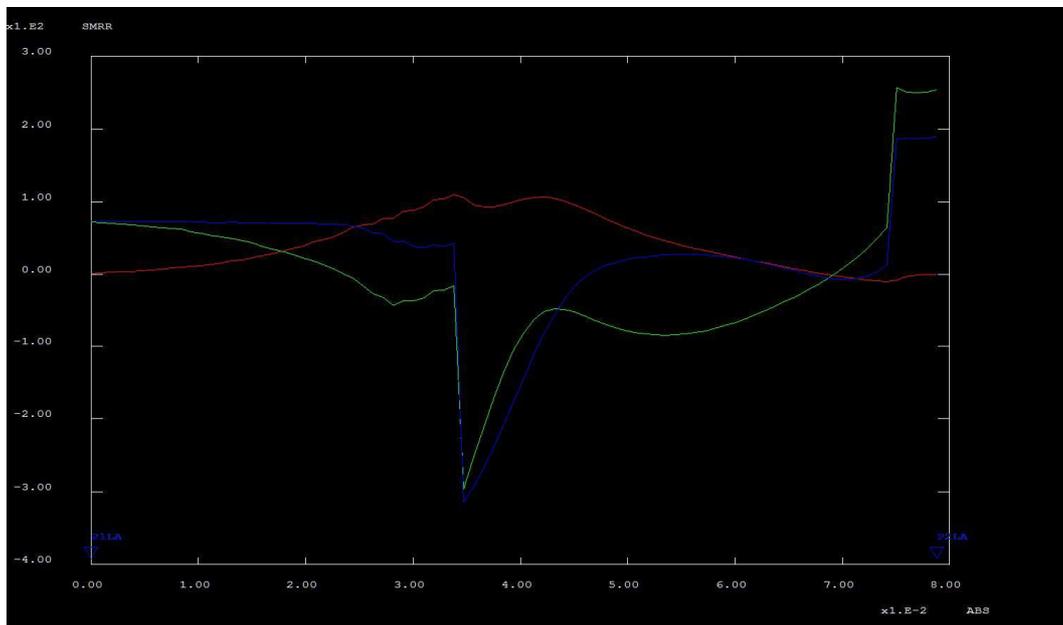


Figura 67 Simulazione 316_40R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

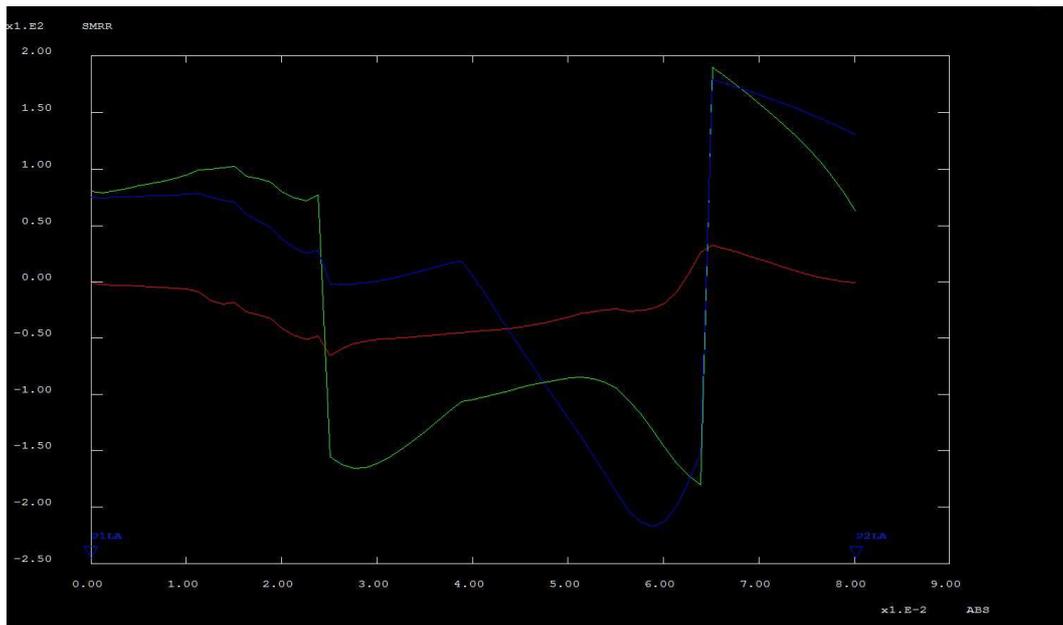


Figura 68 Simulazione 316_40R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

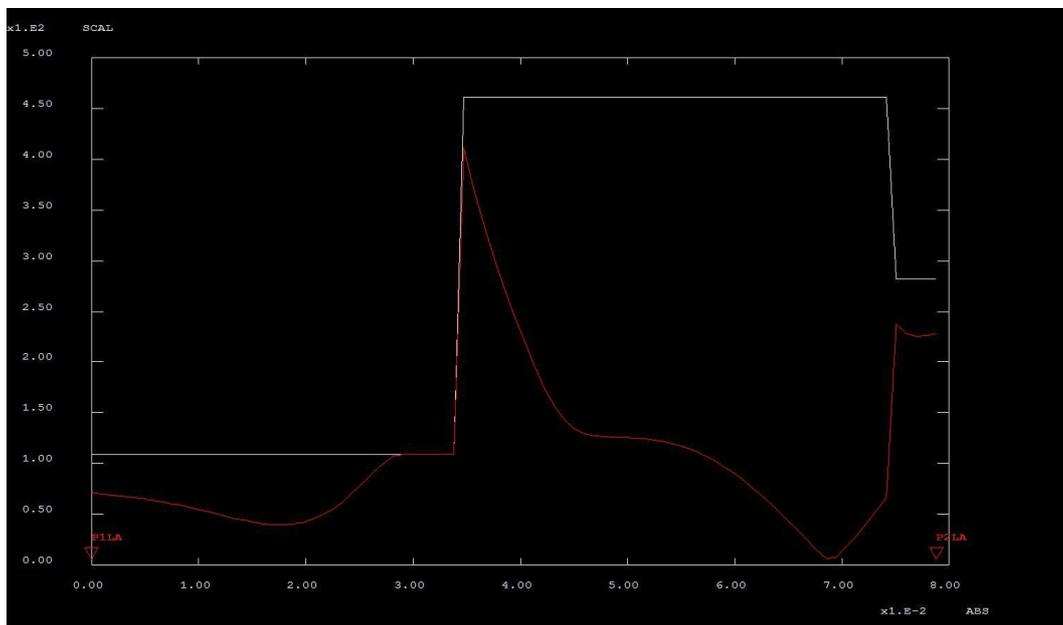


Figura 69 Simulazione 316_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

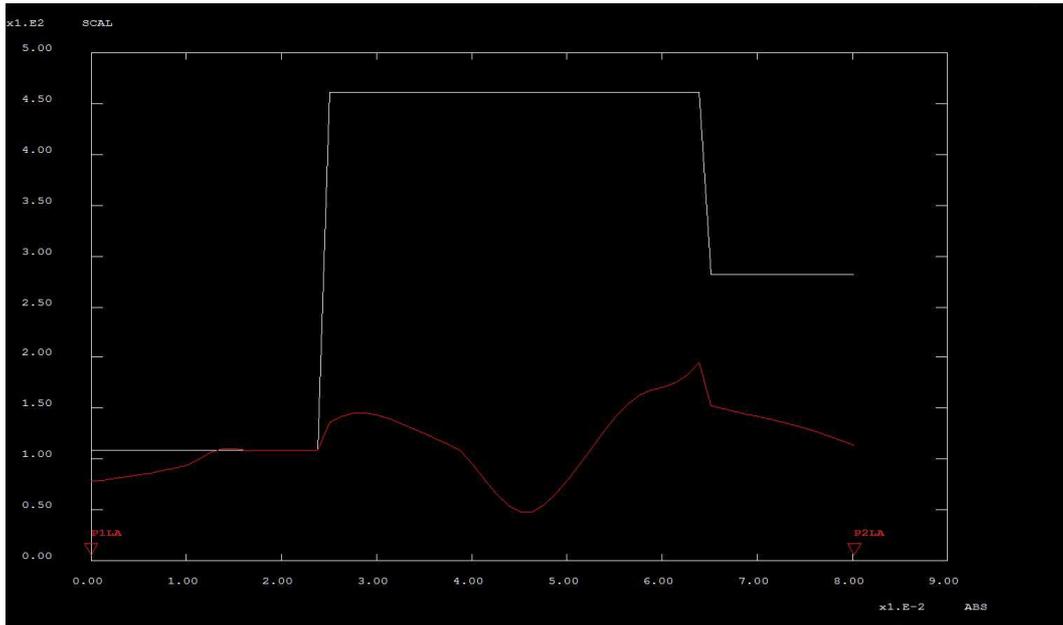


Figura 70 Simulazione 316_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

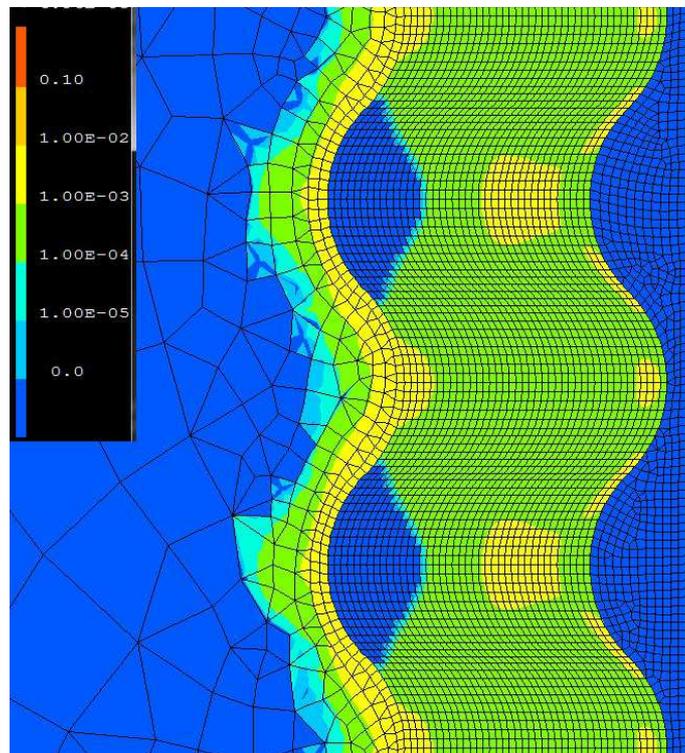


figura 71 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione 316_40R

Nel caso di substrato P91, dal confronto dei grafici delle figure 72 e 73 coi grafici delle figure 61 e 62, si vede che le componenti del campo di tensione nello strato di interfaccia hanno valori simili, mentre aumentando lo spessore dell'interfaccia da 10 a 40 micron diminuiscono le tensioni nello strato esterno.

Un discorso simile vale per la tensione equivalente di Von Mises sulle creste. I grafici nelle figure 63 e 74 relativi alle simulazioni coi due spessori mostrano che la tensione equivalente è pari alla tensione di snervamento nello strato di interfaccia in entrambi i casi, ma al crescere dello spessore dell'interfaccia diminuisce nello strato esterno da valori intorno ai 180 MPa a circa 60 MPa. Dal confronto fra le mappe della deformazione plastica totale (figg. 66 e 76) si nota un aumento del volume della regione di substrato che si è deformato plasticamente in prossimità del coating.

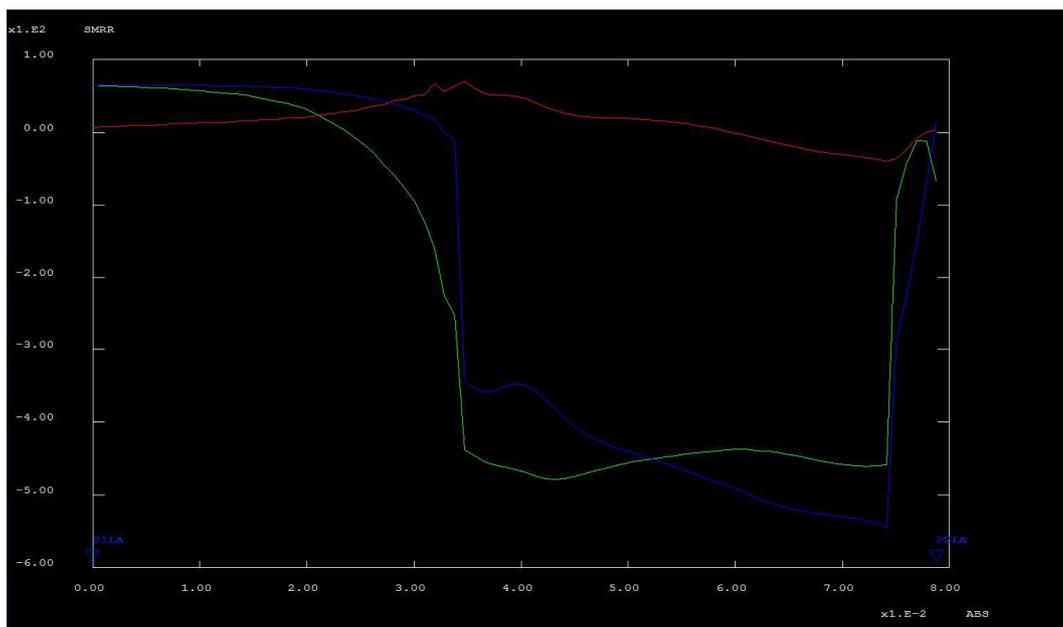


Figura 72 Simulazione P91_40R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta (rosso RR verde ZZ blu TT).

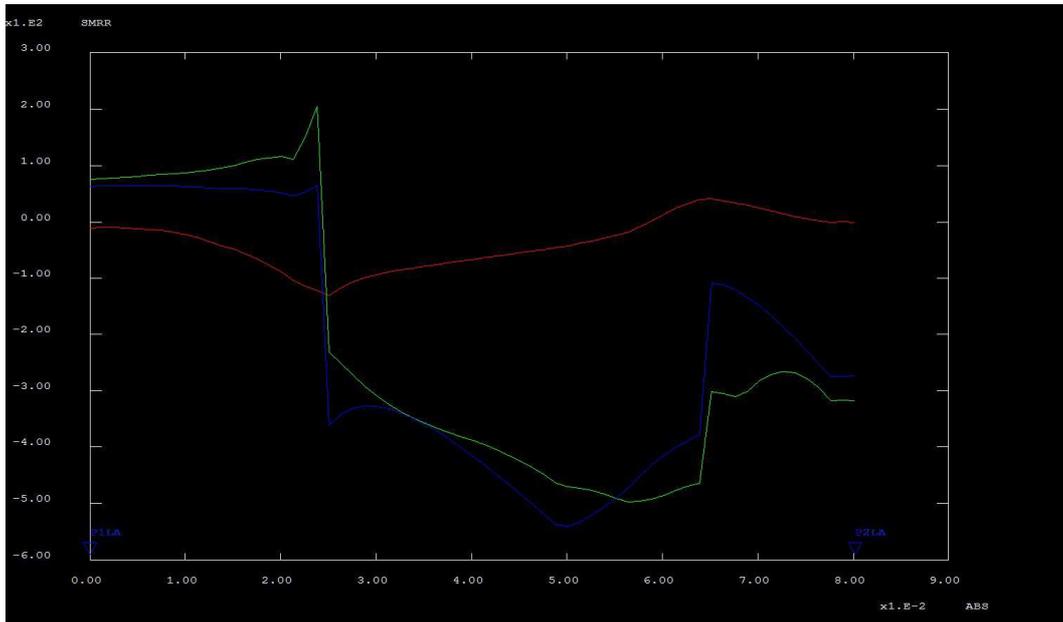


Figura 73 Simulazione P91_40R. Andamento delle componenti del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno (rosso RR verde ZZ blu TT).

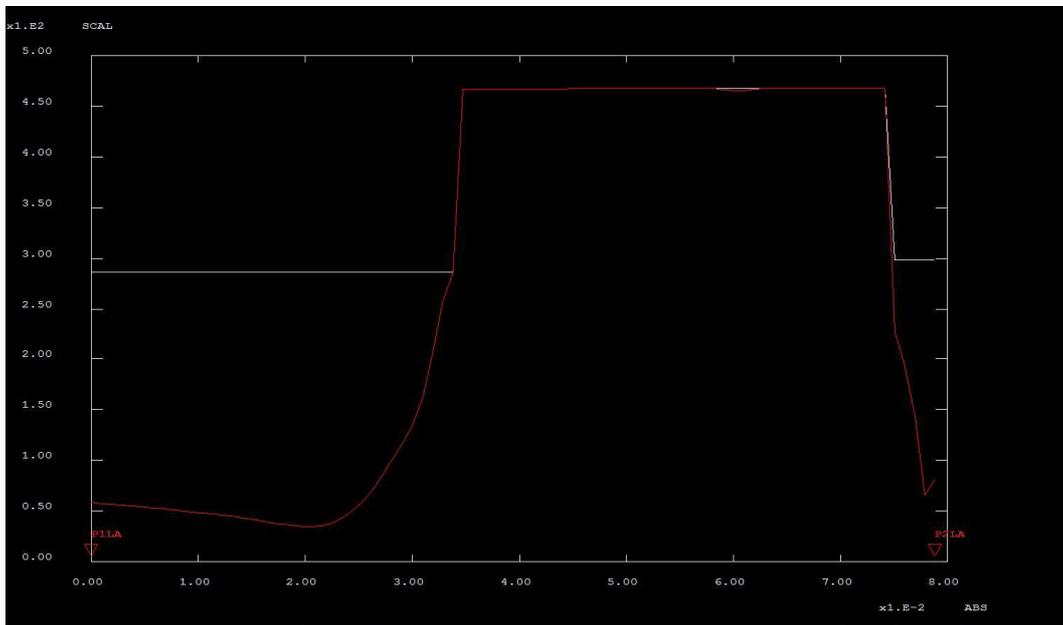


figura 74 Simulazione P91_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sulla cresta. In bianco la tensione di snervamento.

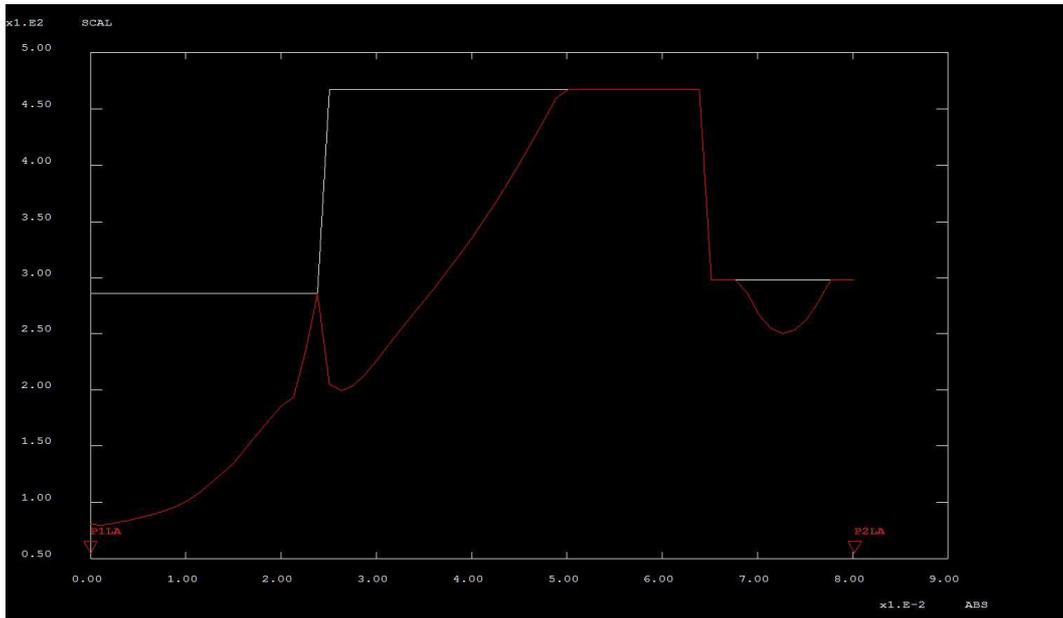


figura 75 Simulazione P91_40R. Andamento della tensione equivalente di Von Mises (rosso) del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione lungo la linea di appoggio sul seno. In bianco la tensione di snervamento.

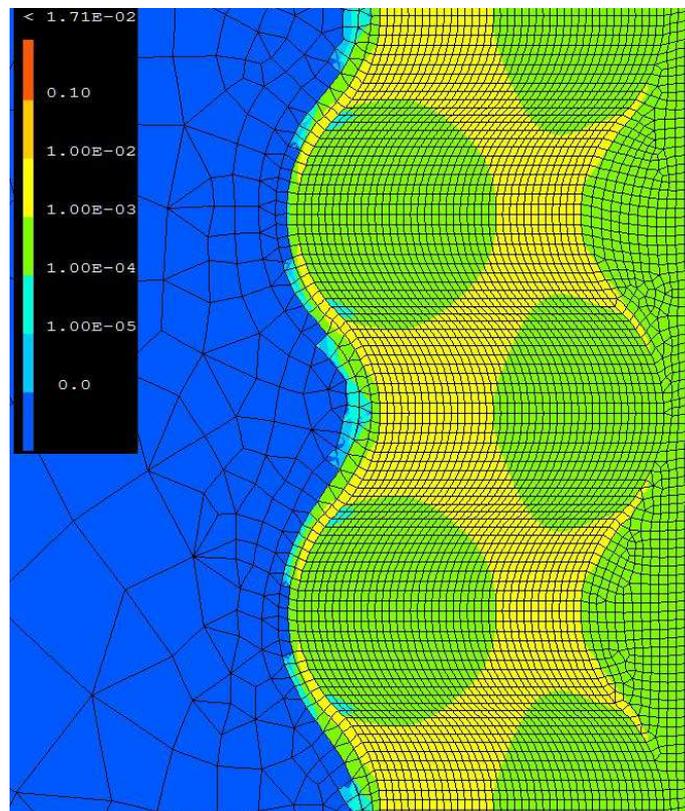


Figura 76 Mappa della deformazione plastica totale relativa al calcolo del campo di tensioni dopo il transitorio termico post deposizione per la simulazione P91_40R

7. Conclusioni

Il problema della corrosione da metallo liquido è attualmente il problema principale nello sviluppo di reattori di quarta generazione refrigerati da metalli liquidi pesanti.

Una possibile strategia per migliorare la resistenza alla corrosione dell'acciaio è quella di realizzare dei trattamenti superficiali che formino sulla superficie uno strato passivante per reazione con l'ossigeno disciolto nel metallo fuso.

In un reattore veloce dove le escursioni di reattività possono causare variazioni di temperatura dell'ordine delle centinaia di gradi e gradienti di temperatura molto intensi, la realizzazione di una ricopertura ottimale dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, capacità di rigenerazione in caso di rottura e stabilità sotto irraggiamento neutronico, rappresenta una importante sfida tecnologica che richiede una conoscenza dettagliata delle sollecitazioni prodotte dalle condizioni operative a livello microscopico nonché dei meccanismi di rottura.

In questo ambito è stato sviluppato un programma per la simulazione termico-strutturale in campo non lineare delle tensioni generate da carichi termici su rivestimenti su acciaio. È stato utilizzato il codice agli elementi finiti Cast3M, sviluppato dal Dipartimento di Meccanica e Tecnologie (DMT) della Commissione francese per l'Energia Atomica (CEA).

La simulazione per mezzo di analisi agli elementi finiti rappresenta un potente strumento a supporto della progettazione e messa a punto del rivestimento in termine di spessore e proprietà termiche e meccaniche degli strati poiché permette di calcolare i profili di tensione e la deformazione plastica prodotti all'interno delle strutture per effetto di carichi meccanici e/o termici.

Il codice sviluppato partendo da una definita successione degli strati del coating e geometria dell'interfaccia calcola le tensioni prodotte da transitori di temperatura su una ricopertura multistrato. Lo stato di tensione dovuto al processo di deposizione del coating viene stimato simulando il raffreddamento del sistema coating-substrato da uno stato libero da tensioni alla temperatura di deposizione alla temperatura ambiente.

Il codice è stato impiegato per simulare le tensioni termiche prodotte su una ricopertura di una lega di alluminio e ferro depositata sulla superficie esterna di un provino cilindrico cavo. Per il substrato si sono considerati due casi l'acciaio austenitico SS316 e l'acciaio martensitico P91 che sono due dei principali materiali proposti per componenti di reattori di IV generazione.

Si è considerato un coating composto da due strati, uno di interfaccia col substrato ed uno esterno. Per lo strato di interfaccia è stato considerato l'intermetallico Fe_3Al mentre per lo strato esterno si è preso l'intermetallico $FeAl$ con concentrazione molare 48.71%Al 50.87% Fe. Con ciò si è voluto simulare il caso del tutto ipotetico, seppure verosimile, della deposizione di un coating con concentrazione del 30% in peso circa in alluminio e la formazione di uno strato all'interfaccia col substrato di uno strato più ricco in ferro per diffusione del ferro durante la deposizione.

Tutte le simulazioni sono state eseguite considerando un comportamento elastico isotropo perfettamente plastico dei componenti il sistema, non avendo a disposizione i parametri per poter eseguire simulazioni con modelli più raffinati.

Per valutare l'effetto della rugosità della superficie del substrato sull'evoluzione delle tensioni termiche nel coating, oltre alla simulazione su un provino con superfici di separazione fra gli strati lisce, è stata presa in considerazione una morfologia superficiale rappresentata in sezione da una curva periodica composta da quarti di circonferenza. E' stato inoltre variato per entrambi i substrati lo spessore degli strati mantenendo fisso lo spessore complessivo del coating.

Le simulazioni mettono in evidenza l'importanza oltre che delle differenze nel coefficiente di dilatazione termica, dei valori di tutti i parametri caratteristici dei materiali coinvolti nel calcolo così come il loro comportamento con la temperatura.

Nel caso di substrato liscio sia le simulazioni relative al calcolo delle tensioni residue che quelle relative al calcolo delle tensioni legate al transitorio termico successivo si ottiene un campo di tensioni che giace su piani paralleli al piano tangente alla superficie esterna del substrato.

Lo strato del rivestimento con più bassa tensione di snervamento, quando le tensioni prodotte dai transitori termici non sono tali da superare la tensione di snervamento in tutto il coating, funziona da strato tampone e rilassa le tensioni deformandosi plasticamente. Le simulazioni effettuate considerando una superficie rugosa mostrano che le irregolarità della superficie del substrato comportano una redistribuzione delle tensioni per cui il campo risultante ha componenti radiale RR e di taglio RZ diverse da zero in prossimità delle superficie di separazione fra gli strati e fra coating e substrato. Nella geometria considerata le tensioni radiali e di taglio RZ comportano sforzi normali alle interfacce e se di intensità sufficiente possono produrre fessure fra gli strati o fra coating e rivestimento innescare processi che portano a rottura.

La modulazione delle intensità del campo di tensioni con la rugosità della superficie produce inoltre massimi di tensione che eccedono sensibilmente i valori calcolati supponendo superficie regolari e di conseguenza anche valori di deformazione plastica sono localmente molto più elevati di quelli trovati nel caso di substrato liscio. La redistribuzione degli sforzi interessa anche il substrato e le simulazioni mostrano che a differenza di quanto succede nel caso di superficie liscia, il substrato si deforma plasticamente nelle zone adiacenti il rivestimento su uno spessore localmente fino alla decina di micron.

Dopo questa prima fase di sviluppo per poter applicare il codice per lo sviluppo e progettazione di rivestimenti sarà necessario sottoporlo a validazione sperimentale. Per questo si dovranno eseguire campagne di misura volte ad ottenere i valori effettivi dei parametri coinvolti nella simulazione così come i valori dei campi di tensioni prodotti dai transitori di temperatura. I risultati delle simulazioni mettono in evidenza alcuni miglioramenti da apportare al codice: dalle mappe di deformazione plastica si vede che la griglia non è stata infittita nella regione del substrato prossima al rivestimento dove a posteriori si vede che i campi di tensione e la deformazione plastica possono interessare regioni con bassa densità di nodi, inoltre il raffinamento della griglia nella zona del coating risulta troppo spinto.

Nelle attività che seguiranno sarà opportuno costruire la griglia modulando la densità dei nodi sulla base dei risultati di una simulazione termo meccanica preliminare.

Bisogna inoltre apportare integrazioni al programma per poter tenere in considerazione l'effetto della porosità degli strati del coating e delle variazioni dei parametri caratteristici dei materiali con il tempo legati a processi di invecchiamento.

Bibliografia

1. I.V. Gorynin, G.P. Karzov, V.G. Markov, V.S. Lavrukhin, V.A. Yakovlev
Proceedings of Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology (HLMC-98), Obninsk, Russia, 1998, p.120
2. G.Muller, A.Heinzel, J.Konys, G.Schumacher, A.Weisenburger, F.Zimmermann, V.Engelko, A.Rusanov, V.Markov Journal of Nuclear Materials **335** (2004) 163–168
3. G.S. Yachmenyov, A.Ye. Rusanov, B.F. Gromov, Yu.S. Belomytsev, N.S. Skvortsov, A.P. Demishonkov, Proceedings of Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology (HLMC-98), Obninsk, Russia, 1998, p.133
4. S. Takaya, T. Furukawa, K. Aoto, G. Mueller, A. Weisenburger, A. Heinzel, M. Inoue, T. Okuda, F. Abe, S. Ohnuki, T. Fukjiwara, A. Kimura J. Nucl. Mater **386–388** (2009) 507–510
5. R. Kasada, N. Toda, K. Yutani, H.S. Cho, H. Kishimoto, A. Kimura J. Nucl. Mater **367–370** (2007) 222–228
6. S.I. Porollo, A.M. Dvoriashin, Yu.V. Konobeev, F.A. Garner J. Nucl. Mater **329–333** (2004) 314–318
7. Lanshi Zheng, S. Ramalingam . Vac. Sci. Technol. A **13** (1995) 2390-2399
8. Lanshi Zheng, S. Ramalingam Tribol. Int **28** (1995) 145-161
9. Liu Xiequan, Ni Xinhua, Wang Junying Key Engineering Materials **280-283** (2005) 1775-1778
10. M. Huang Z. Zuo, Q. MA, H. Fujimoto J. Mater. Res. **15** (2000) 1239-1242
11. Y.Pauleau Vacuum **61** 2001 175-181
12. Xiaolin Shu et al. J.Mater.Sci.Technol. **17** (2001) 601-604
13. B.V.Reddy, S.C. Deevi Intermetallics **8** (2000) 1369-1376
14. E.P. George, I. Baker Intermetallics **6** (1998) 759-763
15. RCC-MR Edition 2007
16. M.R. Harmouche, A. Wolfenden Mat. Sci. Eng. **84** (1986) 45-42
17. Haijun Ma, Yajiang Li, S.A. Gerasimov, Juan Wang, Xiaolei Sun Materials Letters **62** (2008) 1953-1956
18. McKamey, C.G., J.H. DeVan, P.F. Tortorelli, and V.K. Sikka 6(8) (1991) 1779-1805
19. E. P. George and I. Baker, in The Encyclopedia of Materials: Science and Technology, (Eds: K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan), Elsevier Press (Pergamon), 2001, 4201-4205.
20. A. Rudajevová, J.Burianek Journal of Phase Equilibria and Diffusion **22** (2001) 560-563

Appendice A. Istruzioni per la creazione della griglia del provino con superficie liscia

```

opti dime 2 elem qua8 mode axis ;
opti sauver 'maglia.sauve' ;
dens 2.;
* Dati Geometria
* Dimensioni_lunghezze in mm
Ri=5.; mess raggio interno provino;
Sp_sub = 1.; mess spessore substrato;
Sp_int = 0.04 ; mess spessore strato interfaccia;
Sp_coat = 0.01 ; mess spessore del coating;
lun_tot = 0.3; mess lunghezza del provino;
* Raggio esterno provino
R2 = Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat ;
* Raggio semicerchi
RaggRug = 0.02 ;
*Costruzione del provino
* Punti Substrato
P1s = Ri 0.;
P2s = (Ri + Sp_sub) 0 ;
P3s = (Ri + Sp_sub) lun_tot ;
P4s = (Ri ) lun_tot ;
*
* Maglia Substrato
L1s = D P1s P2s 'DINI' 0.1 'DFIN' .002;
L2s = D 200 P2s P3s ;
L3s = D P3s P4s 'DINI' .002 'DFIN' 0.1;
L4s = D 5 P4s P1s ;
Ltots = L1s et L2s et L3s et L4s;
Trac Ltots;
SSubRo = surf Ltots ;
rad1us = (coor 1 SSubRo);
ev1de= evol manu (prog ri (ri+sp_sub)) (prog 0.1 0.002);
denz1 = vari ev1de rad1us;
ssub = surf Ltots DenZ1;
* Maglia Coating
P2c = (Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat ) 0 ;
P3c = (Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat ) (COOR 2 P3s) ;
* Maglia Interfaccia
SInt = L2s tran 40 (Sp_int 0) coul 'ROUG';
P2i = (cote 3 SInt) poin 'FINAL';
p3i = (cote 2 SInt) poin 'FINAL';
L1i = inve (cote 4 SInt) ;
L2i = inve (cote 3 SInt) ;
L3i = inve (cote 2 SInt) ;
* Maglia Coating
L1c = D 10 P2i P2c ;
L2c = D 200 P2c P3c ;
L3c = D 10 P3c P3i ;
*
    
```

```

Ltotc = L1c et L2c et L3c et (inve L2i) ;
SCoat = surf Ltotc coul 'VERT';
*
S_Est = SInt et SCoat ;
S_tot = SSub et SInt et SCoat ;
elim 0.00001 S_tot ;
rege S_Tot;
*
Regconv = CONT S_Tot ;
Supest = L2c ;
*
Cotinf = L1s et L1i et L1c;
Cotsup = L3s et L3i et L3c;
Trac S_tot;
*
* Zona irraggiata
LiZirgiu = P1s;
LiZirsuu = P4s;
Zirr = Regconv elem comp LiZirsuu LiZirgiu ;
*
* Linee di appoggio
P1La1 = S_tot POIN 'PROC'
((Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-(RaggRug / (2.** (1 / 2))))
(0.5 * lun_tot));
P2La1 = S_tot POIN 'PROC' ((R2) (0.5 * lun_tot));
enn1= enti (500 *
(R2 - (Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-(RaggRug / (2.** (1 / 2))))));
LaP1 = D enn1 P1La1 P2La1 ;
*
P1La2 = S_tot POIN 'PROC' ((Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-
(RaggRug / (2.** (1 / 2)))) (lun_tot * 0.39));
P2La2 = S_tot POIN 'PROC'
((R2) (lun_tot * 0.39));
enn2 = enti (500 * (R2 - ((Ri + Sp_sub) - (0.7 * RaggRug))));
LaP2 = D enn2 P1La2 P2La2 ;
trac (S_tot et lap1 et lap2);
*
sauver (S_tot et LaP1 et LaP2 ) ;
*
fin;
    
```

Appendice B. Istruzioni per la creazione della griglia del provino con superficie rugosa

```

opti dime 2 elem qua8 mode axis ;
opti sauver 'maglia.sauve' ;
dens 2.;
* Dati Geometria
* Dimensioni_lunghezze in mm
Ri=5.; mess raggio interno provino;
Sp_sub = 1.; mess spessore substrato;
Sp_int = 0.01 ; mess spessore strato interfaccia;
Sp_coat = 0.04 ; mess spessore del coating;
* Raggio esterno provino
R2 = Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat ;
* Ampiezza della regione irraggiata
*AmpZirr = lun_tot ;
*SZirr = AmpZirr / 2 ;
* Raggio semicerchi
RaggRug = 0.02 ;
*Lungtot = (2 **.5) * RaggRug * 9;
*Costruzione del provino
* Punti Substrato
P1s = Ri 0.;
P2s = (Ri + Sp_sub) 0 ;
*P3s = (Ri + Sp_sub) lun_tot ;
*P4s = (Ri ) lun_tot ;
* Maglia Substrato
L1s = D P1s P2s 'DINI' 0.1 'DFIN' .002;
L2s = ZIGZAG P2s (1. 1.) (0. 1.) 200 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90)
'R' RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90) 'R' RaggRug 'A' 90 'R'
RaggRug 'A' (-90) 'R' RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90) 'R'
RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug ;
*'R' RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90) 'R' RaggRug 'A' 90 'R'
*RaggRug 'A' (-90) 'R' RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90) 'R'
*RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug 'A' (-90) 'R' RaggRug 'A' 90 'R' RaggRug;
P3s= L2s poin 'FINAL';
mess (coor 2 p3s) ;
lun_tot = coor 2 p3s;
P4s= (Ri )(COOR 2 P3s);
L3s = D P3s P4s 'DINI' .002 'DFIN' 0.1;
L4s = D 10 P4s P1s ;
Ltots = L1s et L2s et L3s et L4s;
Trac Ltots;
SSubRo = surf Ltots ;
rad1us = (coor 1 SSubRo);
ev1de= evol manu (prog ri (ri+sp_sub)) (prog 0.1 0.002);
denz1 = vari ev1de rad1us;
*Trac SSubRo DenZ1;
*SSub = raff ssubro denz1;
ssub = surf Ltots DenZ1;
*Trac SSub;
    
```

* Maglia interfaccia e coating

* Punti Interfaccia

*P1i = (Ri + Sp_sub) 0.;

*P2i = (Ri + Sp_sub + Sp_int) 0 ;

*P3i = (Ri + Sp_sub + Sp_int) (COOR 2 P3s) ;

* Punti Coating

P2c = (Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat) 0 ;

P3c = (Ri + Sp_sub + Sp_int + Sp_coat) (COOR 2 P3s) ;

* Maglia Interfaccia

Slnt = L2s tran 10 (Sp_int 0) coul 'ROUG';

P2i = (cote 3 Slnt) poin 'FINAL';

p3i = (cote 2 Slnt) poin 'FINAL';

L1i = inve (cote 4 Slnt) ;

L2i = inve (cote 3 Slnt) ;

L3i = inve (cote 2 Slnt) ;

* Maglia Coating

L1c = D 40 P2i P2c ;

L2c = D 200 P2c P3c ;

L3c = D 40 P3c P3i ;

*

Ltotc = L1c et L2c et L3c et (inve L2i) ;

Scoat = surf Ltotc coul 'VERT';

*

S_Est = Slnt et SCoat ;

S_tot = SSub et Slnt et SCoat ;

elim 0.00001 S_tot ;

rege S_Tot;

*

Regconv = CONT S_Tot ;

*Trac Regconv ;

Supest = L2c ;

Cotinf = L1s et L1i et L1c;

Cotsup = L3s et L3i et L3c;

Trac S_tot;

*

* Zona scaldada ad induzione

*LiZirgiu = Supest poin proc (R2 ((lun_tot / 2) - SZirr)) ;

*LiZirsuu = Supest poin proc (R2 ((lun_tot / 2) + SZirr)) ;

LiZirgiu = P1s;

LiZirsuu = P4s;

Zirr = Regconv elem comp LiZirsuu LiZirgiu ;

*

* Linee di appoggio

P1La1 = S_tot POIN 'PROC'

((Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-(RaggRug / (2.** (1 / 2))))

(0.5 * lun_tot));

P2La1 = S_tot POIN 'PROC' ((R2) (0.5 * lun_tot));

enn1= enti (500 *

(R2 - (Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-(RaggRug / (2.** (1 / 2)))));

LaP1 = D enn1 P1La1 P2La1 ;

*

```

P1La2 = S_tot POIN 'PROC' ((Ri + Sp_sub - (0.7 * RaggRug)-
(RaggRug / (2.** (1 / 2)))) (lun_tot * 0.39));
P2La2 = S_tot POIN 'PROC'
((R2) (lun_tot * 0.39));
enn2 = enti (500 * (R2 - ((Ri + Sp_sub) - (0.7 * RaggRug))));
LaP2 = D enn2 P1La2 P2La2 ;
trac (S_tot et lap1 et lap2);
sauver (S_tot et LaP1 et LaP2 ) ;
fin;
    
```

Appendice C. Istruzioni per la simulazione dei transistori termici ed i relativi campi di tensione

```

opti dime 2 elem qua8 mode axis ;
opti rest 'maglia.sauve' ;
rest;
opti sauver 'risultati.sauve' ;
trac s_tot;
* Potenza induzione
W_ass = 2.4 ;
* Temperatura di deposizione °C
Td = 550. ;
*Temperatura esterna
Te = 25.;
*      ***PROPRIETA' FISICHE****
*Proprieta termiche substrato (316 da RCC-MR)
att3s=prog 20. 100. 200. 300. 400. 500. 600.;
att4s=prog 20. 50. 100. 150. 200. 250.
300. 350. 400. 450. 500. 550. 600.;
*conducibilità termica substrato
k1s=0.001*(prog 14.28 15.48 16.98 18.49 19.99 21.49 22.99);
ev_ks=evol manu 'T' att3s 'K' k1s;
*dess ev_ks titr 'cond term substrato W/mm C';
*densità substrato kg/mm3
den1s=1.e-9*(prog 7930. 7899. 7858. 7815. 7770. 7724. 7677.);
ev_ds=evol manu 'T' att3s 'RHO' den1s ;
*dess ev_ds titr 'densita substrato';
*Cp substrato J/kg K
cp1s=prog 472. 485. 501. 512. 522. 530. 538.
546. 556. 567. 578. 590. 601.;
ev_cs=evol manu 'T' att4s 'C' cp1s;
*dess ev_cs titr 'calore specifico substrato J/kg K';
*
*proprieta termiche interfaccia
att3i=prog 20. 100. 200. 300. 400. 500. 600. 700.;
att3ri=prog 20. 127. 227. 327. 427. 527. 627. 727.;
att4i=prog 20. 50. 100. 150. 200. 250.
300. 350. 400. 450. 500. 550. 600. 650. 700.;
    
```

*conducibilità termica interfaccia
 $k1i=0.001*(prog\ 9.6\ 11.2\ 12.4\ 13.6\ 14.4\ 15.5\ 16.2\ 16.8);$
 $ev_ki=evol\ manu\ 'T'\ att3i\ 'K'\ k1i;$
 *dessa ev_ki titr 'cond term interfaccia W/mm C';
 *densità interfaccia kg/mm³
 $den1i=1.e-9*(prog\ 5522.25\ 5508.4\ 5497.3\ 5486.2\ 5469.5\ 5455.7$
 $5439.\ 5422.3);$
 $ev_di=evol\ manu\ 'T'\ att3ri\ 'RHO'\ den1i\ ;$
 *dessa ev_di titr 'densita interfaccia';
 *Cp interfaccia J /kg K
 $cp1i=prog\ 560.\ 580.\ 600.\ 615.\ 620.\ 630.\ 650.$
 $655.\ 660.\ 670.\ 680.\ 690.\ 700.\ 710.\ 730.;$
 $ev_ci=evol\ manu\ 'T'\ att4i\ 'C'\ cp1i;$
 *dessa ev_ci titr 'calore specifico interfaccia J/kg K';
 *
 *proprietà termiche coating
 $att3c=prog\ 20.\ 100.\ 200.\ 300.\ 400.\ 500.\ 600.\ 700.;$
 $att3rc=prog\ 20.\ 127.\ 227.\ 327.\ 427.\ 527.\ 627.\ 727.;$
 $att4c=prog\ 20.\ 50.\ 100.\ 150.\ 200.\ 250.$
 $300.\ 350.\ 400.\ 450.\ 500.\ 550.\ 600.\ 650.\ 700.;$
 *conducibilità termica coating
 $k1c=0.001*(prog\ 9.6\ 11.2\ 12.4\ 13.6\ 14.4\ 15.5\ 16.2\ 16.8);$
 $ev_kc=evol\ manu\ 'T'\ att3c\ 'K'\ k1c;$
 *dessa ev_kc titr 'cond term coating W/mm C';
 *densità coating kg/mm³
 $den1c = 1.e-9*(prog\ 6069.6\ 6054.25\ 6042.\ 6029.9\ 6011.6\ 5996.3$
 $5978.\ 5959.7);$
 $ev_dc = evol\ manu\ 'T'\ att3rc\ 'RHO'\ den1c\ ;$
 *dessa ev_dc titr 'densita coating';
 *Cp coating J /kg K
 $cp1c=prog\ 560.\ 580.\ 600.\ 615.\ 620.\ 630.\ 650.$
 $655.\ 660.\ 670.\ 680.\ 690.\ 700.\ 710.\ 730.;$
 $ev_cc=evol\ manu\ 'T'\ att4c\ 'C'\ cp1c;$
 *dessa ev_cc titr 'calore specifico coating J/kg K';
 *
 * Modulo di young Substrato
 $btt4s=prog\ 20.\ 100.\ 200.\ 300.\ 350.\ 400.\ 450.\ 500.\ 550.\ 600.;$
 $ys=1000.*(prog\ 200.\ 193.\ 185.\ 176.\ 172.\ 168.\ 164.\ 159.\ 155.\ 151.);$
 $ev_ys=evol\ manu\ 'T'\ btt4s\ 'YOUN'\ ys;$
 *dessa ev_ys titr 'modulo di Young Substrato';
 * Coefficiente dilatazione termica Substrato mm/(mm C)
 $btt5s=prog\ 20.\ 100.\ 200.\ 300.\ 400.\ 500.\ 600.\ 700.;$
 $alfs=1.e-6*(prog\ 15.3\ 15.9\ 16.6\ 17.2\ 17.8\ 18.3\ 18.7\ 19.0);$
 $ev_alfs=evol\ manu\ 'T'\ btt5s\ 'ALPH'\ alfs;$
 *dessa ev_alfs titr 'alfa Substrato';
 * Sigma snervamento Substrato
 $btt3s=prog\ 20.\ 100.\ 200.\ 300.\ 350.$
 $400.\ 450.\ 500.\ 550. ;$
 $sy1s=prog\ 235.\ 196.\ 159.\ 135.\ 126.\ 120.\ 115.\ 110.\ 106.;$
 $ev_sys=evol\ manu\ 'T'\ btt3s\ 'SIGY'\ sy1s;$

*dess ev_sys titr 'Sy Substrato';

*

Modulo di young Interfaccia Fe3Al DO3

btt4i=prog 25. 200. 510. 650. 849.;

yi=1000.*(prog 161. 147. 123. 116. 96.);

ev_yi=evol manu 'T' btt4i 'YOUN' yi;

*dess ev_yi titr 'modulo di Young Interfaccia';

* Coefficiente dilatazione termica Interfaccia mm/(mm C)

btt5i=prog 20. 100. 200. 300. 400. 500. 600. 700.;

alfi=1.e-5*(prog 1.6 1.65 1.70 1.9 2.0 2.6 2.6 2.7);

ev_alfi=evol manu 'T' btt5i 'ALPH' alfi;

*dess ev_alfi titr 'alfa interfaccia';

* Sigma snervamento Interfaccia

btt3i=prog 25. 125. 225. 325. 425. 525. 625. 700.;

sy1i=prog 780. 780. 780. 650. 550. 450. 350. 200.;

ev_syi=evol manu 'T' btt3i 'SIGY' sy1i;

*dess ev_syi titr 'Sy Interfaccia';

*

* Mecc Coating FeAl B2

* Modulo di young Coating

btt4c=prog 25. 200. 510. 650. 850.;

yc=1000.*(prog 261. 247. 223. 216. 196.0);

ev_yc=evol manu 'T' btt4c 'YOUN' yc;

*dess ev_yc titr 'modulo di Young Coating';

* Coefficiente dilatazione termica Coating FeAl B2

btt5c=prog 20. 100. 200. 300. 400. 500. 600. 700.;

alfc=1.e-5*(prog 1.6 1.7 1.85 1.9 1.95 2.00 2.1 2.15);

ev_alfc=evol manu 'T' btt5c 'ALPH' alfc;

*dess ev_alfc titr 'alfa Coating';

* Sigma snervamento Coating

btt3c=prog 25. 125. 225. 325. 425. 525. 625. ;

sy1c=prog 1050. 1040. 1000. 800. 525. 250. 170. ;

ev_syc=evol manu 'T' btt3c 'SIGY' sy1c;

*dess ev_syc titr 'Sy Coating';

*

* RAFFREDDAMENTO DALLA TEMPERATURA DI DEPOSIZIONE

* PER IL CALCOLO DELLE TENSIONI RESIDUE

* Modello

modsu = mode Ssub thermique isotrope ;

modin = mode Sint thermique isotrope ;

modco = mode Scoat thermique isotrope ;

mod2 = mode Regconv convection ;

* Caratteristiche materiale

matsu = mate modsu 'K' ev_ks 'C' ev_cs 'RHO' ev_ds ;

matin = mate modin 'K' ev_ki 'C' ev_ci 'RHO' ev_di ;

matco = mate modco 'K' ev_kc 'C' ev_cc 'RHO' ev_dc ;

mat2 = mate mod2 'H' (20. / 1000000) ;

* Tempi

```

T_mpo = 60. ;
dt= 5.;
Steps = 1 + (T_mpo / dt) ;
xt_p=prog 0. pas dt T_mpo;
T3ster = prog Steps * Te ;
evol1= evol manu 'TEMPS' xt_p 'COEFF' T3ster ;
*
* Flusso per convezione
flu_c = conv mod2 mat2 'T' Te ;
*
* Temperatura Di Deposizione
T_mp_d = MANU CHPO S_Tot nature diffus 1 'T' Td;
*
cha_r = char 'TECO' flu_c evol1 ;
*
ta = table ;
ta. 'TEMPERATURES' = table;
ta. 'TEMPERATURES' . 0 = T_mp_d;
ta. 'MODELE' = modsu et modin et modco et mod2;
ta. 'CARACTERISTIQUES' = matsu et matin et matco et mat2;
ta. 'CHARGEMENT' = cha_r ;
ta. 'PROCEDURE_THERMIQUE' = DUPONT;
ta. 'CELSIUS' = vrai ;
ta. 'CRITERE' = 1.E-5;
ta. 'TEMPS_CALCULES' = xt_p ;
ta. 'PROCESSEURS' = AUTOMATIQUE ;
pasapas ta ;
*
nn = dime ta. 'TEMPERATURES' ;
t_S_Tot = ta. 'TEMPERATURES'.(nn-1) ;
Trac t_S_Tot S_Tot (cont S_Tot);
*
* Sottocampi di temperatura
t_S_sub = REDU t_S_Tot SSub ;
t_S_int = REDU t_S_Tot SInt ;
t_S_coat = REDU t_S_Tot SCoat ;
*
sauver ta;
*
*          CALCOLO TENSIONI RESIDUE
*
* Modello
O_S_sub=mode SSub mecanique
elastique isotrope plastique parfait ;
O_S_int=mode SInt mecanique
elastique isotrope plastique parfait ;
O_S_coat=mode SCoat mecanique
elastique isotrope plastique parfait;
O_Stot = O_S_sub et O_S_int et O_S_coat;
*
    
```

```

y_ts=vari O_S_sub t_S_sub ev_ys ;
alf_ts=vari O_S_sub t_S_sub ev_alfs ;
sy_ts =vari O_S_sub t_S_sub ev_sys;
sy_t1s= vari O_S_sub t_S_sub ev_sys 'STRESSES' ;
*

y_ti=vari O_S_int t_S_int ev_yi ;
alf_ti=vari O_S_int t_S_int ev_alfi ;
sy_ti =vari O_S_int t_S_int ev_syi;
sy_t1i= vari O_S_int t_S_int ev_syi 'STRESSES' ;
*

y_tc=vari O_S_coat t_S_coat ev_yc ;
alf_tc=vari O_S_coat t_S_coat ev_alfc ;
sy_tc =vari O_S_coat t_S_coat ev_syc;
sy_t1c= vari O_S_coat t_S_coat ev_syc 'STRESSES' ;
*

sy_t = sy_ts et sy_ti et sy_tc ;
sy_t1= sy_t1s + sy_t1i + sy_t1c ;
*

M_Surs=mate O_S_sub young ev_ys sigy ev_sys nu nu1 alph ev_alfs ;
M_Suri=mate O_S_int young ev_yi sigy ev_syi nu nu1 alph ev_alfi ;
M_Surc=mate O_S_coat young ev_yc sigy ev_syc nu nu1 alph ev_alfc;
M_Stot = M_Surs et M_Suri et M_Surc ;
*

* Vincoli
B1=bloq uz Cotinf;
B2=rela 'ENSE' uz Cotsup;
B_tot = B1 et B2;
*

T3mpi_th = ta.temps;
T3mpe_th = ta.temperatures;
Cha_Th = char 'T' T3mpi_th T3mpe_th;
np1 = dime T3mpi_th;
t_fin = ta.temps . (nn - 1);
*

sauver T3mpi_th;
sauver T3mpe_th;
*

ta1 = 'TABLE' ;
ta1 .'MODELE' = O_Stot;
ta1 .'CARACTERISTIQUES' = M_Stot ;
ta1 .'BLOCAGES_MECANIQUES' = B_tot;
ta1 .'CHARGEMENT' = Cha_Th ;
ta1 .'TEMPS_CALCULES' = ta. 'TEMPS_CALCULES' ;
ta1. 'PROCESSEURS' = AUTOMATIQUE ;
TMASAU=table;
ta1. 'MES_SAUVEGARDES'=TMASAU;
TMASAU .'DEFTO'=VRAI;
TMASAU .'DEFIN'=VRAI;
PASAPAS ta1 ;
*
    
```

```

sauver ta1;
*
passo_f= dime (ta1 . deplacements);
spo_f=ta1. deplacements . (passo_f - 1);
*
dei= defo S_tot 0. spo_f;
dea= defo S_tot 4. spo_f roug;
*
titr 'deformata';
trac (dea et dei);
*
S_mec = ta1 . contraintes . (passo_f - 1);
titr 'Tensioni residue';
trac O_Stot S_mec (cont S_tot);
Vmis1 = VMIS O_Stot S_mec;
sy_t1 = sy_t1s et sy_t1i et sy_t1c ;
Pla1 = sy_t1 - Vmis1 ;
titr 'Sy - Vmis';
trac O_Stot Pla1 (cont S_tot);
*
PrTrac = prog 0. 1.e-5 1.e-4 1.e-3 1.e-2 1.e-1;
titr 'Total equivalent plastic strain';
trac o_stot ta1.variables_internes.(passo_f-1) PrTrac ;
*
s_cha = chan noeud O_Stot S_mec ;
sy_cha = chan noeud O_Stot sy_t1 ;
svm_cha = chan noeud O_Stot Vmis1 ;
*
OB_SM1 = PROI LaP1 s_cha ;
OB_YP1 = PROI LaP1 sy_cha;
OB_VM1 = PROI LaP1 svm_cha;
*
OB_SM2 = PROI LaP2 s_cha;
OB_YP2 = PROI LaP2 sy_cha;
OB_VM2 = PROI LaP2 svm_cha;
*
ev_r1= evol roug chpo OB_SM1 smrr LaP1 ;
ev_z1= evol vert chpo OB_SM1 smzz LaP1 ;
ev_t1= evol bleu chpo OB_SM1 smtt LaP1 ;
ev_Y1= evol blan chpo OB_YP1 LaP1 ;
ev_V1= evol roug chpo OB_VM1 LaP1 ;
dess (ev_r1 et ev_z1 et ev_t1 ) titr 'Stress Residui LAPP sulla
cresta Rou RR Ver ZZ Ble TT';
dess (ev_Y1 et ev_V1) titr 'Stress Residui LAPP sulla cresta
Von Mises Roug Sy Bia ';
*
ev_r2= evol roug chpo OB_SM2 smrr LaP2 ;
ev_z2= evol vert chpo OB_SM2 smzz LaP2 ;
ev_t2= evol bleu chpo OB_SM2 smtt LaP2 ;
ev_Y2= evol blan chpo OB_YP2 LaP2 ;
    
```

```

ev_V2= evol roug chpo OB_VM2 LaP2 ;
dess (ev_r2 et ev_z2 et ev_t2 ) titr 'Stress Residui LAPP sul
seno Rou RR Ver ZZ Ble TT';
dess (ev_Y2 et ev_V2) titr 'Stress Residui LAPP sul seno
Von Mises Roug Sy Bia ';
*
*
***          TRANSITORIO DI TEMPERATURA ESERCIZIO
*
* Tempi
T_mp2 = 1. ;
dt2= 0.05;
Step2 = 1 + (T_mp2 / dt2) ;
xt_2=prog 0. pas dt2 T_mp2;
coe_1 = prog Step2 * 1. ;
evol2= evol manu 'TEMPS' xt_2 'COEFF' coe_1 ;
* Flusso imposto dall'induzione
flind = flux modsu W_ass Zirr ;
* Flusso per convezione
flconv = conv mod2 mat2 'T' Te ;
* Carichi termici
cha_1 = char 'Q' flind evol2 ;
cha_2 = char 'TECO' flconv evol2 ;
cha_t = cha_1 et cha_2;
* Temperatura zero
Tem_ini = MANU CHPO S_Tot nature diffus 1 'T' Te ;
*
ta2 = table ;
ta2. 'TEMPERATURES' = table ;
ta2. 'TEMPERATURES'. 0 = Tem_ini ;
ta2. 'MODELE' = modsu et modin et modco et mod2 ;
ta2. 'CARACTERISTIQUES' = matsu et matin et matco et mat2 ;
ta2. 'CHARGEMENT' = cha_t ;
ta2. 'PROCEDURE_THERMIQUE' = DUPONT ;
ta2. 'CELSIUS' = vrai ;
ta2. 'TEMPS_CALCULES' = xt_2 ;
ta2. 'PROCESSEURS' = AUTOMATIQUE ;
pasapas ta2 ;
*
sauver ta2;
*
nn2 = dime ta2. 'TEMPERATURES';
t_S_Tra = ta2. 'TEMPERATURES'.(nn2-1);
trac t_S_Tra S_Tot (cont S_Tot);
*
*          CALCOLO MECCANICO FINALE
*
tempi_th = ta2.temps ;
tempe_th = ta2.temperatures ;
Char_Th = char 'T' tempi_th tempe_th ;
    
```

```

n_1 = dime tempi_th ;
t_f_n = ta2.temps . (n_1 - 1) ;
*
*sauver Tempi_th;
*sauver Tempe_th;
*
ta3 = table ;
ta3. 'CONSTRAINTES' = table ;
ta3. 'DEPLACEMENTS' = table ;
ta3. 'MODELE' = O_Stot ;
ta3. 'CARACTERISTIQUES' = M_Stot ;
ta3. 'BLOCAGES_MECANIQUES' = B_tot ;
ta3. 'CHARGEMENT' = Char_Th ;
ta3. 'CONSTRAINTES'. 0 = S_mec ;
ta3. 'DEPLACEMENTS'. 0 = spo_f ;
ta3. 'TEMPS_CALCULES' = 'PROG' 0. 'PAS' 0.005 t_f_n ;
ta3. 'PROCESSEURS' = AUTOMATIQUE ;
TMASAU = table;
ta3. 'MES_SAUVEGARDES' = TMASAU;
TMASAU. 'DEFTO' = VRAI;
TMASAU. 'DEFIN' = VRAI;
*
PASAPAS ta3 ;
*
pas_f= dime (ta3 . deplacements);
sp_f=ta3. deplacements . (pas_f - 1);
deif= defo S_tot 0. sp_f;
deaf= defo S_tot 4. sp_f roug;
titr 'deformata';
trac (deaf et deif);
sy_tfs = vari O_S_sub t_S_Tra ev_sys 'STRESSES' ;
sy_tfi = vari O_S_int t_S_Tra ev_syi 'STRESSES' ;
sy_tfc = vari O_S_coat t_S_Tra ev_syc 'STRESSES' ;
S_mecf = ta3 . contraintes . (pas_f - 1);
titr 'Tensioni alla fine del transitorio di temperatura';
trac O_Stot S_mecf (cont S_tot);
Vmisf = VMIS O_Stot S_mecf;
sy_tf = sy_tfs et sy_tfi et sy_tfc ;
Plaf = sy_tf - Vmisf ;
titr 'Sy - Vmis';
trac O_Stot Plaf (cont S_tot);
titr 'Total equivalent plastic strain';
trac o_stot ta3.variables_internes.(pas_f - 1) PrTrac ;
s_fcha = chan noeud O_Stot S_mecf ;
sy_fcha = chan noeud O_Stot sy_tf ;
vm_fcha = chan noeud O_Stot Vmisf ;
*
OF_SM1 = PROI LaP1 s_fcha ;
OF_YP1 = PROI LaP1 sy_fcha;
OF_PVM1 = PROI LaP1 vm_fcha;
    
```

*

OF_SM2 = PROI LaP2 s_fcha;
OF_YP2 = PROI LaP2 sy_fcha;
OF_PVM2 = PROI LaP2 vm_fcha;

*

ev_1rf= evol roug chpo OF_SM1 smrr LaP1 ;
ev_1zf= evol vert chpo OF_SM1 smzz LaP1 ;
ev_1tf= evol bleu chpo OF_SM1 smtt LaP1 ;
ev_1Yf= evol blan chpo OF_YP1 LaP1 ;
ev_1VMf = evol roug chpo OF_PVM1 LaP1 ;
dess (ev_1rf et ev_1zf et ev_1tf)
titr 'Stress LAPP sulla cresta Rou RR Ver ZZ Ble TT';
dess (ev_1Yf et ev_1VMf) titr 'Stress LAPP sulla cresta
Von Mises Roug Sy Bia';

*

ev_2rf= evol roug chpo OF_SM2 smrr LaP2 ;
ev_2zf= evol vert chpo OF_SM2 smzz LaP2 ;
ev_2tf= evol bleu chpo OF_SM2 smtt LaP2 ;
ev_2Yf= evol blan chpo OF_YP2 LaP2 ;
ev_2VMf= evol roug chpo OF_PVM2 LaP2 ;
dess (ev_2rf et ev_2zf et ev_2tf)
titr 'Stress LAPP sul seno Rou RR Ver ZZ Ble TT';
dess (ev_2Yf et ev_2VMf) titr 'Stress LAPP sul seno
Von Mises Roug Sy Bia';
sauver ta3;
fin;