



UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÁ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

TRIBOLOGIA DI RIVESTIMENTI ALSi E Zn NELLO STAMPAGGIO
A CALDO

*TRIBOLOGICAL PERFORMANCES OF ALSi AND Zn COATINGS IN
HOT STAMPING*

Relatore: Prof. Ghiotti Andrea

Correlatore: Ing. Medea Francesco

Laureando: Giarin Federico

Matr. n. 1020336

Anno Accademico 2014/2015

INDICE

Sommario	3
Capitolo 1	
INTRODUZIONE	5
1.1 Caso industriale e problema scientifico	5
1.2 Obbiettivi della tesi	6
1.3 Articolazione dell'elaborato	7
Capitolo 2	
FONDAMENTI TEORICI	9
2.1 Attrito	9
2.2 Usura	10
2.3 Lo stampaggio a caldo	13
2.4 Un po' di storia	14
2.5 Materiali impiegati	15
2.6 Analisi della letteratura	17
2.7 Le fasi dello stampaggio a caldo	18
• Il riscaldamento	
• La formatura e il raffreddamento	
Capitolo 3	
PIN ON DISK TEST	25
3.1 Apparato strumentale	26
3.2 Caratterizzazione dei materiali	29
3.3 Strategia sperimentale adottata	32

Capitolo 4		
ANALISI DEI RISULTATI	37	
4.1	Analisi lamiera 22MnB5	37
4.2	Coefficiente d'attrito	44
4.3	Parametri termici	48
4.4	Variazione di peso e dell'area di usura dei pin	52
4.5	Analisi microscopica della superficie dei pin e lamiera	64
Capitolo 5		
CONCLUSIONI		73
INDICE DELLE FIGURE		77
INDICE DELLE TABELLE		81
ACRONIMI		83
Bibliografia		85

Sommario

Negli ultimi anni l'evoluzione delle costruzioni automobilistiche ed aeronautiche, con la ricerca di pezzi con elevate resistenze meccaniche, un peso ridotto e un costo accettabile, ha fatto sì che lo stampaggio a caldo sia il processo produttivo più utilizzato e studiato.

Nonostante i numerosi vantaggi che si ottengono con questo processo, le alte temperature e i cicli termici adottati comportano al processo problemi legati a usura e ossidazione.

Per evitare la decarburazione, gli sbozzati in acciaio sono protetti con particolari rivestimenti;. Nel lavoro esposto si è esaminato l'acciaio alto resistenziale 22MnB5 protetto da due rivestimenti a base di alluminio-silicio e zinco che hanno dimostrato una rilevante influenza nel comportamento tribologico durante le fasi di formatura.

Prove di tipo pin on disk test sono state effettuate per indagare sul comportamento tribologico all'interfaccia tra stampo e lamiera, questo grazie all'attitudine dimostrata del test nel riprodurre in laboratorio le condizioni derivanti all'interfaccia tra gli stampi e la lamiera, replicando sollecitazioni termiche e meccaniche che insorgono ciclicamente sugli stampi.

Gli acciai testati sono l' AISI H11, HTCS1® e HTCS3® e ci si è concentrati sull'analisi dell'andamento del coefficiente d'attrito, dei parametri termici, e dell'usura delle superfici. Inoltre i test sono stati eseguiti a 800 °C, 700 °C e 600 °C per verificare la stabilità del comportamento dei rivestimenti delle lamiere al variare della temperatura e del materiale degli stampi.

I risultati ottenuti mostrano che il rivestimento a base di zinco offre un comportamento circa costante alle tre temperature, e a 800 °C permette di ottenere un coefficiente d'attrito leggermente minore al rivestimento alluminio-silicio, che invece al calare della temperatura offre prestazioni peggiori a causa di una spiccata tendenza all'usura adesiva. Tuttavia, con questo tipo di rivestimento accoppiato agli acciai HTCS1® e HTCS3® si sono misurate prestazioni migliori rispetto al caso con H11. Dal punto di vista dell'attrito, in quanto risulta inferiore e con un andamento più lineare in tutte le casistiche, salvo nel caso a 700°C dove l'acciaio H11 evidenzia un coefficiente d'attrito minore. Dal punto di vista dell'usura, poiché risulta minore la rugosità riscontrata e dal punto di vista delle temperature, con temperature medie di lavoro inferiori rispetto al caso con H11.

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 Caso industriale e problema scientifico

La produzione di parti in acciaio alto resistenziale in campo aeronautico e automobilistico tramite formatura a caldo è ad oggi una tecnologia ampiamente diffusa.

Il metodo di stampaggio a caldo ad oggi più utilizzato è quello diretto, il processo prevede un riscaldamento della lamiera in acciaio alto resistenziale in forno ad una temperatura maggiore della temperatura di austenizzazione e un trasferimento allo stampo seguito da formatura e tempra in solido alla chiusura degli stampi. Il risultato è un componente ad elevata resistenza meccanica ed omogenea struttura martensitica.

Nonostante i numerosi vantaggi che si ottengono, le alte temperature e i cicli termici generati in questo processo comportano problemi di ossidazione e decarburazione delle lamiere causati dal contatto con l'aria nel trasferimento dal forno allo stampo e problemi di usura tra stampo e lamiera causata dall'impossibilità di utilizzare un lubrificante all'interfaccia stampo-lamiera alle alte temperature.

Per ridurre tali problematiche la soluzione industriale è rivestire le lamiere grezze con particolari rivestimenti. Attualmente il rivestimento più utilizzato è AlSi risultando efficace nella prevenzione dell'ossidazione e decarburazione, ma non altrettanto attivo ai problemi legati all'usura e corrosione. Per tale motivo si sta introducendo e studiando un nuovo tipo di rivestimento a base di Zn.

1.2 Obiettivi della tesi

Viste le elevate temperature necessarie alla formatura a caldo dei pezzi, le lamiere grezze vengono rivestite con film protettivi che evitano l'ossidazione e la decarburazione degli sbozzati.

Nelle linee di produzione è importante tenere sotto controllo l'usura dei pezzi e i significativi cambiamenti di geometria degli stampi, che potrebbero causare superfici indesiderate o, in casi più estremi, parti difettose. Pertanto, la ricerca di nuove soluzioni che offrano performance migliori sotto questo aspetto assume una notevole importanza.

Il seguente lavoro presenta uno studio comparativo del comportamento tribologico tra una soluzione attualmente utilizzata, che prevede acciaio AISI H11 per la realizzazione degli stampi e lamiere in acciaio al boro alto resistenziale rivestite Usibor® 1500, e alcune alternative sia per il materiale degli stampi, che per il rivestimento delle lamiere.

Per quanto riguarda gli stampi, si è analizzato il comportamento degli acciai HTCS1® e HTCS3® attualmente in via di sviluppo. Per le lamiere invece si è testato un innovativo rivestimento a base di zinco, sul quale sono già stati condotti alcuni studi preliminari [1,2].

Il coefficiente d'attrito e il tasso d'usura, oltre che dal tipo di materiale, dipendono anche dalle caratteristiche del tipo di accoppiamento che si viene a creare sulle superfici dei materiali a contatto. Per determinare il comportamento di un certo accoppiamento è quindi necessario eseguire delle prove specifiche sui componenti reali. Tuttavia l'esecuzione di prove industriali su una reale linea di produzione avrebbe costi troppo impegnativi, richiederebbe troppo tempo e i risultati sarebbero di difficile interpretazione, a causa della difficoltà che si riscontrerebbe nel cercare di distinguere l'influenza delle singole variabili di processo.

Pertanto sono state eseguite simulazioni tramite pin on disk test che, come dimostrato in [3,4], permette di replicare in laboratorio con buoni risultati le sollecitazioni termiche e meccaniche alle quali sono sottoposti ciclicamente gli stampi.

Grazie alla versatilità del test adottato, che permette di variare tutti i parametri di processo, oltre alla temperatura di 800 °C, che simula le condizioni reali di stampaggio a caldo delle lamiere, si è scelto di eseguire le stesse prove anche alle temperature di 600 °C e 700 °C, al fine di verificare la stabilità del comportamento dei rivestimenti delle lamiere.

1.3 Articolazione dell'elaborato

Il lavoro precedentemente esposto è articolato nel seguente modo:

- Capitolo 1: viene introdotto l'argomento dello studio fornendone una visione generale;
- Capitolo 2: vengono esposti alcuni fondamenti teorici degli argomenti trattati al fine di rendere più comprensibili le conclusioni e le motivazioni che hanno spinto a svolgere questa tipologia di analisi;
- Capitolo 3: si descrive l'apparato strumentale del pin on disk test e la procedura seguita per condurre la prova;
- Capitolo 4: si analizzano e si discutono i dati raccolti nei test;
- Capitolo 5: esposizione delle conclusioni a cui si è giunti.

Capitolo 2

FONDAMENTI TEORICI

2.1 Attrito

L'attrito è una forza che si esercita tra due corpi posti a contatto e che si oppone al loro moto reciproco. Per avviare tale moto tra due corpi inizialmente fermi tenuti in contatto da una forza normale F_N , è necessario applicare una forza tangenziale F'_T almeno uguale alla forza d'attrito F_T .

Il rapporto $F'_T / F_N = \mu_s$ è detto coefficiente d'attrito statico. Una volta avviato il moto, il coefficiente d'attrito tra i due corpi si riduce leggermente e prende il nome di coefficiente d'attrito cinematico μ come mostrato in figura 1.

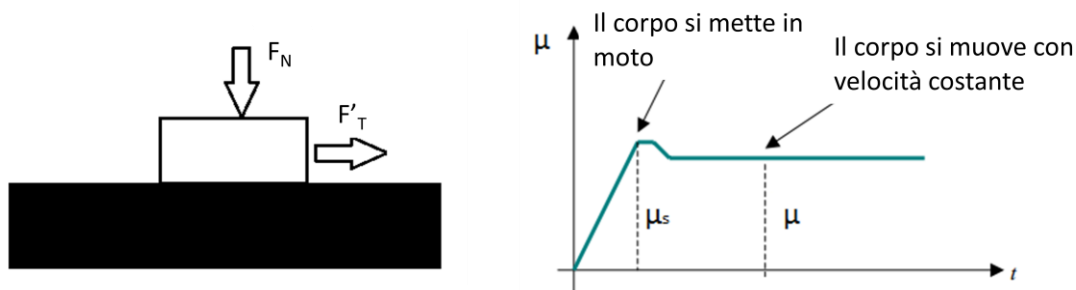


Figura 1: Schematizzazione del moto tra due corpi a contatto con definizione di coefficiente di attrito statico e cinematico.

Il coefficiente d'attrito si può anche esprimere tramite la resistenza a taglio τ delle microsaldature (figura 2) che vengono a formarsi tra le asperità delle superfici a contatto e la tensione normale σ , che equivale, per una asperità deformata plasticamente alla durezza del materiale: $\mu = F / N = \tau / \sigma$

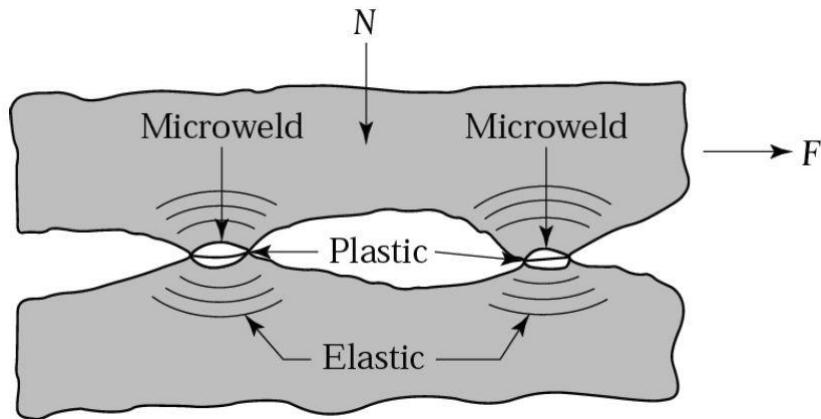


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'interfaccia tra due superfici di contatto.

Coulomb a fine XVII secolo tramite i suoi esperimenti suppose che il coefficiente d'attrito, sia statico che cinematico appariva essere dipendente da:

- Natura dei materiali a contatto;
- Stato delle superfici.

mentre sembrava essere indipendente da:

- Carico normale alle superfici di contatto;
- Area apparente della superficie di contatto;
- Velocità del moto relativo;

Tali caratteristiche, a seguito di sperimentazioni sempre più approfondite, si sono rilevate non esattamente corrispondenti alla realtà e si è constatato che i coefficienti d'attrito dipendono da:

- Caratteristiche meccaniche e natura dei materiali a contatto;
- Stato delle superfici (rugosità, pulizia);
- Temperatura;
- Pressione di contatto;
- Velocità di strisciamento;
- Tempo di contatto.

Per forze di contatto contenute e aree di contatto estese lo sforzo normale alle asperità è prevalentemente elastico.

Incrementando il carico lo sforzo aumenta e si può pervenire a deformazione plastica delle giunzioni. Aumentando lo sforzo aumentano le asperità in contatto, alcune di loro sono sottoposte a deformazione elastica, altre a deformazione plastica. Il contatto di queste asperità crea un legame adesivo chiamate microwelds (microsaldature) dipendenti dalle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche delle due superfici. Per esempio, più la superficie è pulita, più legami adesivi si formeranno.

Ulteriori parametri che influenzano il coefficiente d'attrito sono le proprietà meccaniche dei materiali, come la durezza o la duttilità. Più è debole l'interfaccia, più è basso il coefficiente d'attrito.

La temperatura gioca un ruolo molto importante nella determinazione del coefficiente d'attrito, in quanto influenza vari parametri che lo controllano. Per esempio, le proprietà meccaniche sono una funzione della temperatura: al suo aumentare generalmente si osserva una riduzione della durezza dei materiali. Tuttavia l'aumentare della temperatura favorisce anche altre fenomeni, come l'ossidazione delle superfici, che influenzano a loro volta le condizioni tribologiche.

Infine, per alte velocità di strisciamento il coefficiente d'attrito sarà minore in quanto i tempi di contatto sono inferiori e le microsaldature non riescono a formarsi.

Di notevole importanza sono anche le combinazioni dei precedenti fattori. Nel caso degli acciai per esempio, a carichi normali elevati e alte velocità di strisciamento corrispondono coefficienti di attrito molto bassi poiché si può giungere a fusione locale delle asperità, e il film di metallo liquido agisce da lubrificante tra le superfici.

Tutte queste osservazioni servono per rendere al lettore un quadro della numerose problematiche che possono nascere dalle molteplici variabili in gioco e dalle altrettante loro possibili combinazioni.

2.2 Usura

L'usura è il processo che porta alla rimozione non voluta e progressiva di materiale dalla superficie. Economicamente ha un'importante rilevanza poiché provoca cambiamenti nella geometria di pezzi, utensili e stampi che comportano ulteriori costi. Concentrandosi sugli stampi, la loro sostituzione richiede spese onerose per cui si cerca di ovviare al problema dove possibile utilizzando specifici pezzi e piastre da usura fatte in modo da essere sostituiti facilmente e a costi più sostenibili una volta usurati.

Lo studio dell'usura ha portato all'individuazione di quattro categorie per classificarla:

- Usura adesiva;
- Usura abrasiva;
- Usura corrosiva;
- Usura per fatica superficiale.

La comprensione delle caratteristiche dei meccanismi di usura è fondamentale per poter controllare adeguatamente ogni processo di usura.

L'usura adesiva si verifica quando, in seguito all'applicazione di una forza tangenziale, si arriva a deformazione a taglio nella zona di contatto con rottura della parte più debole e distacco del pezzo che aderisce alla superficie più dura come mostrato nella figura 3.

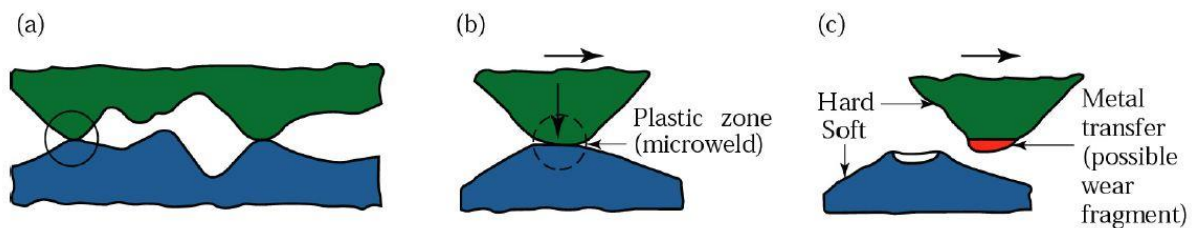


Figura 3: Schematizzazione del meccanismo di usura adesiva.

L'usura abrasiva (figura 4) è suddivisibile in due tipi: *usura a due corpi* quando è dovuta a particelle di natura endogena, *usura a tre corpi* quando è dovuta a particelle di natura esogena. In entrambi i casi, le particelle scalfiscono la superficie asportando materiale sotto forma di trucioli. Maggiore è la durezza di un materiale rispetto all'altro, più elevata sarà la sua resistenza all'usura abrasiva. Se uno dei due materiali risulta particolarmente più duro rispetto all'altro e presenta una rugosità maggiore, le asperità della superficie agiscono allo stesso modo delle particelle asportando trucioli dal materiale con durezza minore.

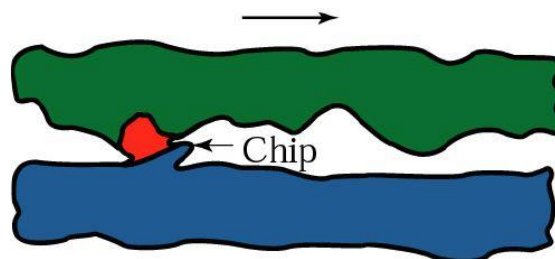


Figura 4: Schematizzazione del meccanismo di usura abrasiva.

L'usura corrosiva (o tribossidativa nel caso di ossidazione) ha luogo in presenza di reazioni chimiche o elettrochimiche tra le superfici e l'ambiente. Il fenomeno è più accentuato in presenza di mezzi corrosivi quali l'acqua (specialmente quella marina), soluzioni acide e ossigeno. I prodotti delle reazioni corrosive ricoprono i corpi in contatto con film superficiali. L'usura abrasiva o adesiva rimuove questo film che aderisce debolmente alla superficie, esponendo nuovo materiale base agli agenti corrosivi, il quale viene a sua volta corrosivo.

L'usura a fatica è causata da carichi periodici che sollecitano ciclicamente la superficie in grado di generare danni a livello microscopico. Questi, sommandosi nel tempo, danno origine alla formazione e alla propagazione di (micro)cricche.

Un altro tipo di usura per fatica è la fatica termica, che porta alla generazione di cricche superficiali come conseguenza di cicli termici che sollecitano ripetutamente la superficie, come avviene ad esempio nel caso di uno stampo freddo che entra in contatto periodicamente con numerosi pezzi ad elevata temperatura.

2.3 Lo stampaggio a caldo

Identifichiamo subito i principali vantaggi dei componenti realizzati tramite il suddetto processo sono:

- *Maggiore resistenza meccanica* dovuta alla disposizione delle fibre e alla compattazione del materiale.
- *Minor peso* grazie all'utilizzo di pezzi più sottili a parità di resistenza meccanica.
- *Risparmio di materiale* perché la bava e il sovrametallo sono di quantità nettamente inferiori rispetto alle materozze che devono essere scartate nel processo di fusione. Ciò implica anche una diminuzione di lavorazioni successive.
- *Eliminazione dei difetti interni* dovuta alla grande compressione che si ottiene mediante lo stampaggio. Ad oggi tutti gli elementi di sicurezza sugli autoveicoli e sugli aerei sono stampati a caldo per ridurre al minimo la possibilità di rotture durante il funzionamento della macchina.

Lo stampaggio a caldo attualmente esiste in due principali varianti: il metodo diretto e indiretto, vedi figura 5.

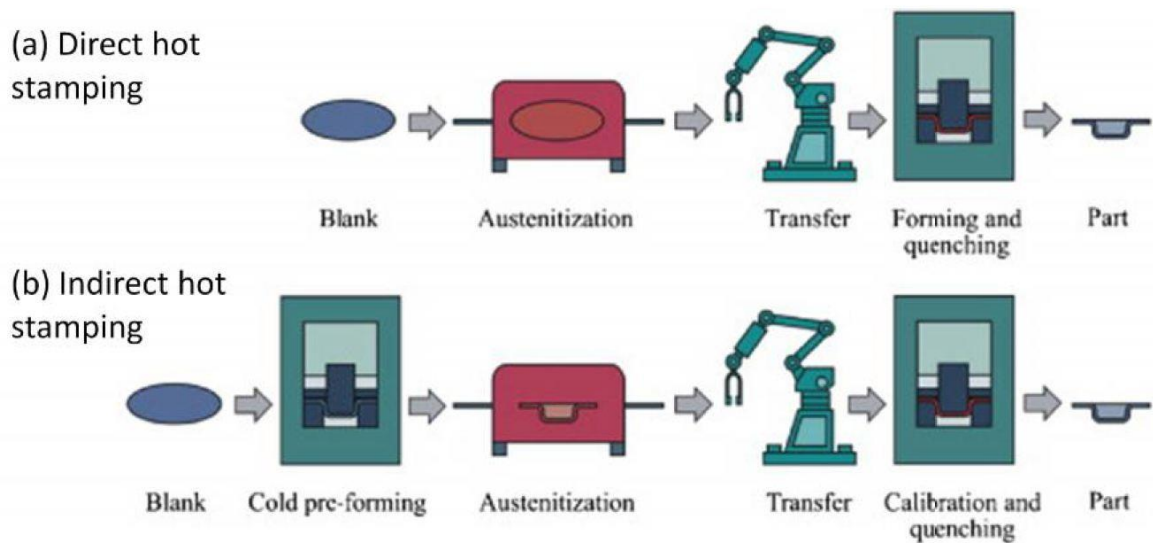


Figura 5: Sequenza delle operazioni di stampaggio a caldo diretto e indiretto.

Nel primo caso la soluzione prevede il riscaldamento della lamiera in forno ad una temperatura maggiore della temperatura di austenizzazione dell'acciaio, il trasferimento ad una pressa e in seguito la formatura contemporaneamente alla tempra alla chiusura degli stampi, in quanto il componente caldo viene messo a contatto con le pareti fredde.

Il processo indiretto invece è caratterizzato da una preformatura a freddo quasi completa della lamiera, un successivo riscaldamento, e solo successivamente il pezzo viene sottoposto ad un'operazione di tempra e calibrazione finale.

Il processo di stampaggio diretto è ad oggi il più utilizzato ed è quello su cui è focalizzato il seguente lavoro.

2.4 Un pò di storia

A causa della crescente domanda di aumentare la sicurezza dei veicoli e di ridurre il peso con il relativo consumo di carburante per rispettare maggiormente l'ambiente che ci circonda, la necessità di produrre componenti strutturali degli autoveicoli con acciai alto resistenziali per mezzo dello stampaggio a caldo si è resa necessaria.

Lo stampaggio a caldo è stato sviluppato e brevettato da una società svedese, Plannja, che ha utilizzato il processo per la produzione di lame per seghe da legno e per taglia erba.

Nel 1984 Saab Automotive AB è stata la prima industria automobilistica ad adottare un acciaio alto resistenziale al boro per la produzione di una automobile.

Il numero di pezzi prodotti con tale tecnologia e con acciai alto resistenziali, aumentarono da 3 milioni pezzi/anno nel 1987 a 8 milioni pezzi/anno nel 1997.

Dall'anno 2000 lo stampaggio a caldo è stato utilizzato per la realizzazione di più parti di una autovettura e il numero è salito fino a 107 milioni pezzi/anno nel 2007.

Lo stampaggio a caldo nell'ambito automobilistico è applicato soprattutto per i componenti del telaio come ad esempio B-pillar, front bumper, roof rail, rocker rail e il tunnel (figura 6).

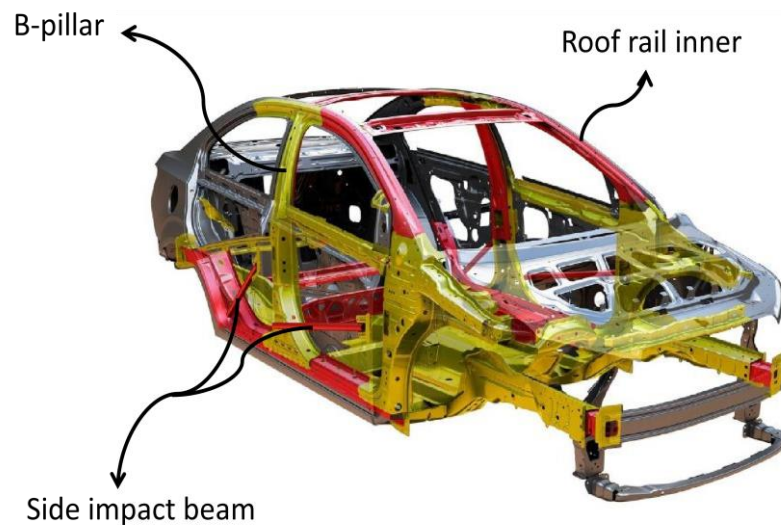


Figura 6: Principali parti stampate a caldo.

2.5 Materiali impiegati

Studi sugli acciai alto resistenziali hanno dimostrato che le leghe al boro 22MnB5, 27MnCrB5 e 37MnB4 sono gli unici tipi di acciaio che producono una struttura completamente martensitica dopo lo stampaggio a caldo con un opportuno raffreddamento degli stampi. Nella tabella 1 sono elencati i componenti chimici degli acciai al Boro.

Acciai	Al	C	B	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
20MnB5	0,04	0,16	0,001	0,23	1,05	-	0,01	0,40	0,034
22MnB5	0,03	0,22	0,002	0,30	1,40	0,005	0,12	0,35	0,040
8MnCrB3	0,05	0,07	0,002	0,37	0,75	0,006	0,01	0,21	0,048
27MnCrB5	0,03	0,25	0,002	0,34	1,24	0,004	0,01	0,21	0,042
37MnB4	0,03	0,33	0,001	0,19	0,81	0,006	0,02	0,31	0,046

Tabella 1: Componenti chimici degli acciaio al boro.

L'acciaio più utilizzato nel processo di formatura ad elevate temperature è il 22MnB5 per le sue caratteristiche di ottima formabilità e resistenza meccanica.

Le lamiere prima di essere processate presentano una struttura ferritica-perlitica con una resistenza a trazione di circa 600 MPa. Al termine del processo di stampaggio a caldo i componenti hanno struttura martensitica e una resistenza circa pari a 1500 MPa, vedi figura 7.

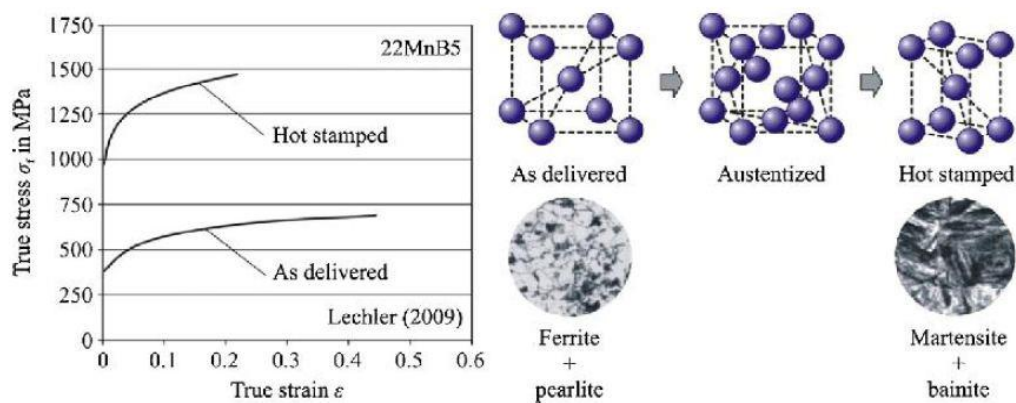


Figura 7: Trasformazioni microstrutturali dell'acciaio 22MnB5.

Per ottenere tali proprietà fisiche e struttura finale le lamiere vengono austenizzate in un forno per almeno 5 minuti a 950 °C. In seguito a questo processo vengono formate e allo stesso tempo raffreddate all'interno di stampi con appositi condotti d'acqua per 5-10 secondi (vedi figura 8).

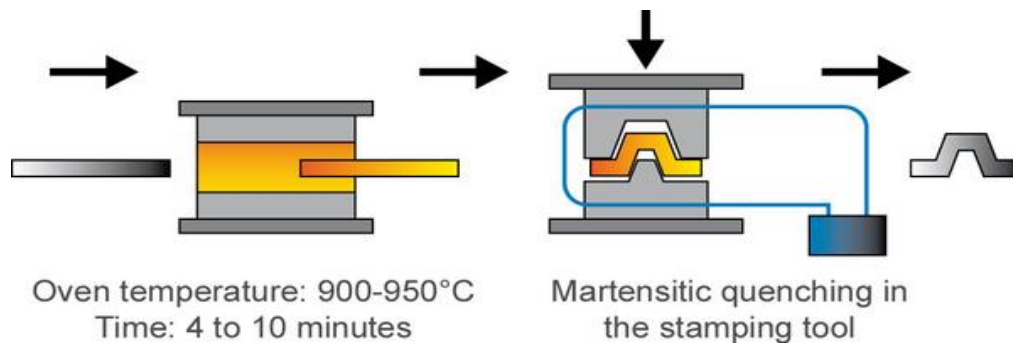


Figura 8: Fasi dello stampaggio a caldo diretto di una lamiera in 22MnB5.

Tra i vari elementi che costituiscono la lega, il manganese, il cromo e il boro hanno una grande importanza sulla temprabilità del componente finale. Dei tre, il boro è quello più rilevante rendendo possibile un'omogenea struttura martensitica al termine del processo. Invece per quanto riguarda le proprietà meccaniche, questi tre elementi hanno solo una piccola influenza.

Il carbonio è il principale responsabile delle proprietà meccaniche dopo tempra. Tramite una corretta regolazione del suo contenuto nell'acciaio si può controllare la resistenza meccanica.

Sotto condizioni di austenizzazione, scaglie di ossido si formano non appena la lamiera viene a contatto con l'aria. Si è quindi soliti rivestire le lamiere grezze con uno strato protettivo, al fine di evitare la decarburazione dell'acciaio e la formazione di ossidi sulla superficie.

Durante il riscaldamento della lamiera l'acciaio subisce un processo di diffusione fino alla superficie del rivestimento. Si vengono così a formare particolari strati di leghe a base di Fe che influiscono positivamente nell'ambito del processo di stampaggio. La protezione attualmente più diffusa è un rivestimento di alluminio-silicio, per prevenire la formazione di incrostazioni sull'acciaio durante il processo di stampaggio. Per ottenere una migliore resistenza alla corrosione recentemente ci si è focalizzati sullo sviluppo di rivestimenti a base di zinco.

2.6 Analisi della letteratura

Una ricerca in letteratura moderna ha dimostrato che diversi test e studi sono stati svolti per comprendere il comportamento tribologico all'interfaccia tra acciai alto resistenziali rivestiti con AlSi e acciai per stampi.

Borsetto etc. [5] ha identificato dei coefficienti d'attrito tra lamiere 22MnB5 rivestite con Al-Si e acciai per stampi in funzione dei più rilevanti parametri di processo.

Hardell etc. [6, 7] ha indagato sul comportamento dell'usura e dell'attrito ad elevate temperatura su acciai alto resistenziali rivestiti con Al-Si sotto scorrimento di diversi acciai per stampi utilizzando un test alternativo; lo scorrimento della lamiera attraverso una macchina con due dischi.

Anche Dessain etc. [8] ha indagato sull'andamento dell'attrito di acciai al boro rivestiti con Al-Si e sull'evolvere dell'usura di diversi acciai per stampi.

Tuttavia, vi è una mancanza di conoscenza che caratterizza il comportamento dell'attrito e dell'usura nei processi industriali a temperature elevate.

2.7 Fasi dello stampaggio a caldo

a) Riscaldamento

Lo stampaggio a caldo prevede di iniziare il processo con il riscaldamento della lamiera all'interno di un forno ad una temperatura maggiore della temperatura di austenizzazione dell'acciaio.

Vengono effettuati dei test al fine di determinare le tempistiche e le temperature per ottenere un'omogenea austenizzazione. In tali prove, dei campioni vengono riscaldati e in seguito bruscamente raffreddati attraverso il contatto su entrambi i lati con pezzi metallici sottoposti a pressioni di circa 40 MPa. Queste condizioni simulano il contatto stampo-lamiera che avviene nel reale processo produttivo. Successivamente si effettuano delle prove di durezza Vickers HV10.

Studi hanno dimostrato che un tempo di permanenza in forno di almeno 3 minuti alla temperatura di 950 °C risulta essere sufficiente per ottenere una completa struttura martensitica nell'acciaio 22MnB5, con una durezza massima di 470 HV. Al diminuire della temperatura del forno per ottenere caratteristiche simili si deve aumentare il tempo di permanenza della lamiera al suo interno.

Come illustrato in figura 9, nel reale processo industriale sono richiesti solo 5 minuti per ottenere il completo processo di diffusione a 850 °C.

Reale ciclo termico del processo

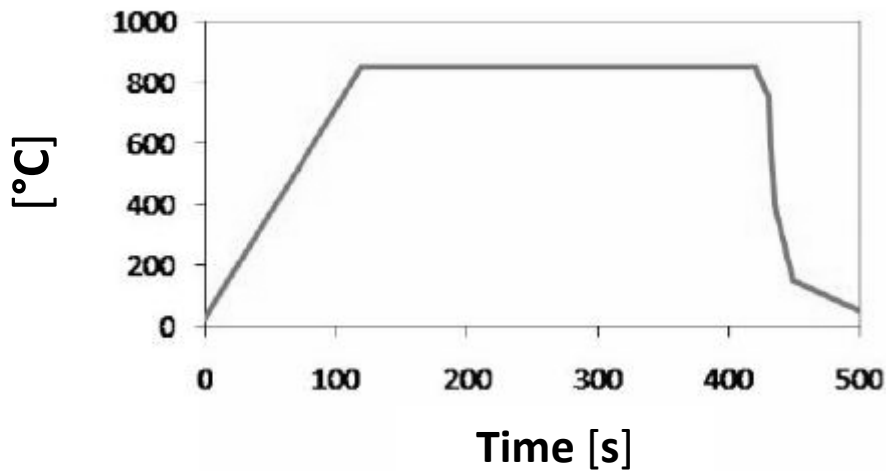


Figura 9: Usuale ciclo termico a cui sono sottoposte le lamiere in acciaio 22MnB5 nel processo di stampaggio a caldo.

I tempi e le temperature di processo giocano un ruolo importante non solo nella determinazione delle proprietà finali del prodotto, ma da essi dipendono pesantemente anche i costi.

A basse temperature e brevi tempi di permanenza in forno corrispondono una maggiore efficienza e minori spese. Si cerca quindi di giungere a dei compromessi tra le proprietà che si vogliono ottenere per il componente e il rapporto costo/efficienza del processo produttivo.

b) Formatura e raffreddamento

Al fine di evitare il raffreddamento della lamiera prima che venga formata, essa deve essere trasportata il più velocemente possibile dal forno agli stampi; inoltre la formatura deve essere completata prima dell'inizio della trasformazione martensitica.

Pertanto una chiusura rapida degli stampi e del trasporto della lamiera sono fattori essenziali per la riuscita del processo, vedi figura 10.

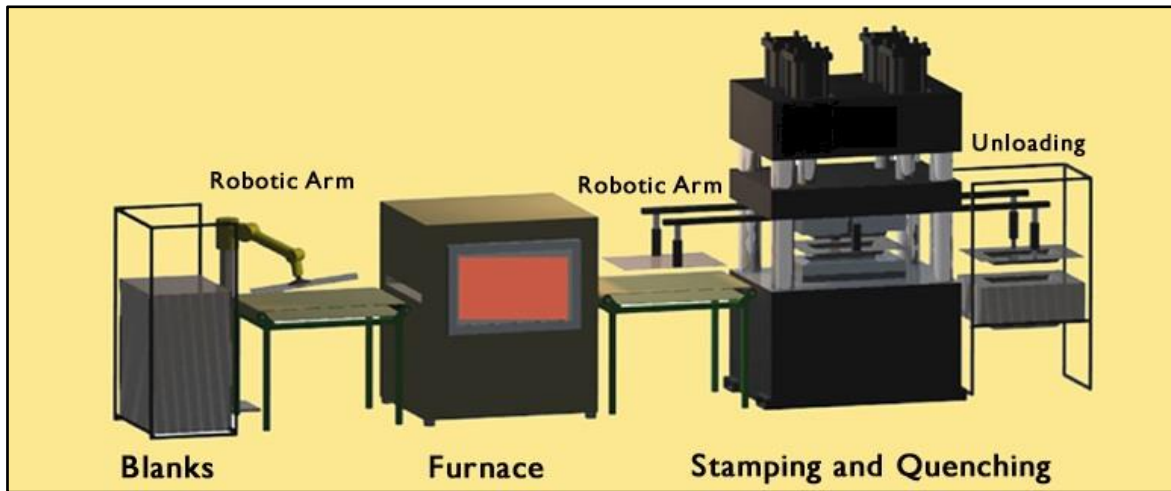


Figura 10: Schematizzazione del processo di stampaggio a caldo diretto.

Contemporaneamente alla formatura, la lamiera viene temprata all'interno degli stampi chiusi, raffreddati con appositi condotti per il passaggio d'acqua (figura 11).

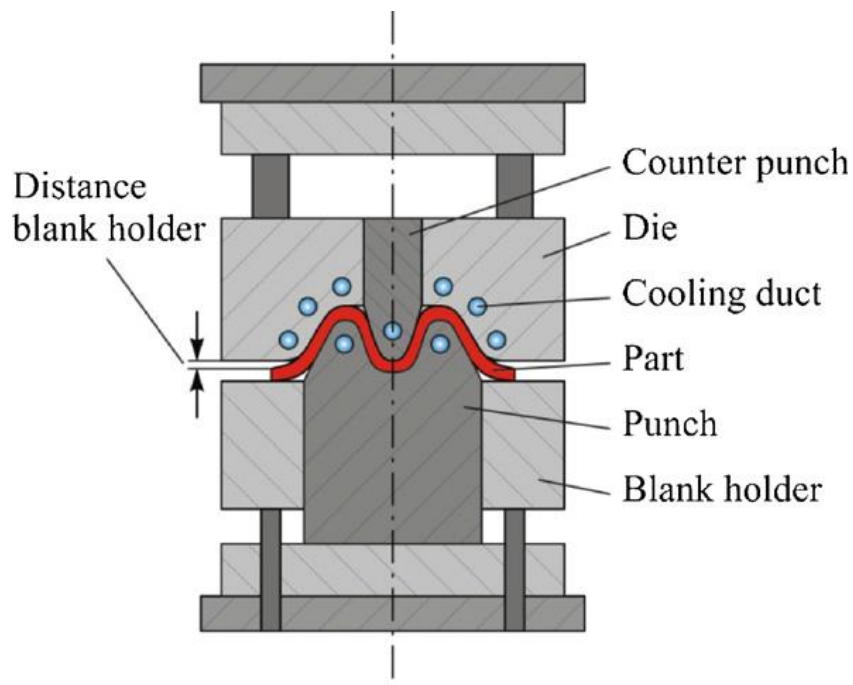


Figura 11: Schematizzazione del processo di contemporanee formatura e tempra delle lamiere nello stampaggio a caldo.

Come mostrato in figura 11, al fine di evitare la formazione di struttura martensitica ai bordi della lamiera, magari soggetti a lavorazioni successive come taglio od eventuali rifiniture, la maggior parte dei sistemi di stampaggio a caldo mantengono tali bordi esterni non a contatto con gli stampi raffreddati, interponendo tra la lamiera e lo stampo una leggera distanza.

L'evoluzione della martensite durante la fase di raffreddamento della lamiera tra gli stampi, illustrata nella figura 12, provoca un sostanziale aumento della resistenza a trazione fino a 1500 Mpa; tale struttura martensitica è il miglior presupposto per avere una elevata resistenza meccanica e agli urti.

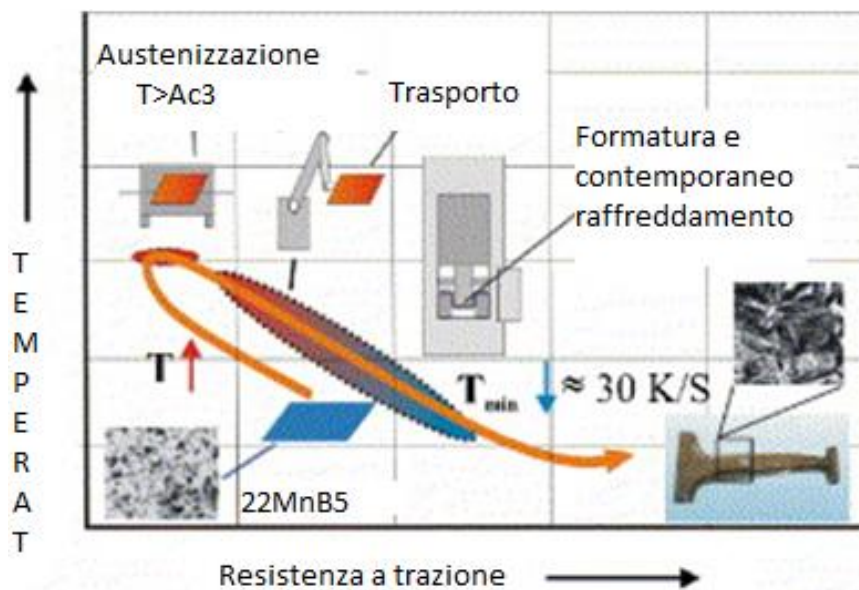


Figura 12: Evoluzione della resistenza a trazione in funzione della temperatura per l'acciaio 22 MnB5.

La forte richiesta di un aumento dell'efficienza della fase di formatura-raffreddamento conduce inevitabilmente alla questione di come abbattere il relativo tempo di ciclo.

Il raffreddamento può essere velocizzato con l'impiego di acciaia per la realizzazione degli stampi con una migliore conducibilità termica e/o sistemi di raffreddamento più efficaci.

Un altro punto dove c'è possibilità di innovazione, sono i condotti per il fluido refrigerante per il raffreddamento; l'obiettivo di quest'ultimi è di temprare la lamiera imponendo almeno una velocità di raffreddamento di 27K/s per ottenere una struttura martensitica completa ed omogenea.

Attraverso tali condotti il flusso di calore del componente formato dipende dal trasferimento di calore dal componente allo stampo, dalla conducibilità termica dello stampo, e dal trasferimento del calore dallo stampo al liquido refrigerante.

La conducibilità termica dello stampo è notevolmente influenzata dalla scelta del materiale con cui viene realizzato.

Lo smaltimento del calore può essere accelerato utilizzando fluidi refrigeranti a basse temperature per aumentare il gradiente di temperatura tra stampi e liquido ed avere un maggiore flusso di calore risultante espulso.

Altro fattore importante per lo smaltimento del calore è la progettazione dei condotti in termini di dimensioni e posizionamento.

Con lo stampaggio a caldo è stata inoltrata la possibilità di diversificare le proprietà su un medesimo componente; un esempio può essere la parte del telaio automobilistico riguardante il B-pillar(vedi figura 13) il quale deve presentare una estrema resistenza nella parte superiore ma allo stesso tempo deve essere in grado di assorbire l'energia generata dalle sollecitazioni che subisce l'automobile nella parte inferiore.

Per ottenere una minor resistenza e quindi una maggior duttilità nella parte inferiore, si può intervenire diminuendo la velocità di raffreddamento sotto i 27 K/s per evitare la completa formazione di struttura martensitica durante il processo di formatura o riducendo la temperatura di riscaldamento sotto la temperatura A_{c3} , ottenendo una austenizzazione incompleta.

Le altre zone del componente sono formate e temprate seguendo il processo tradizionale.

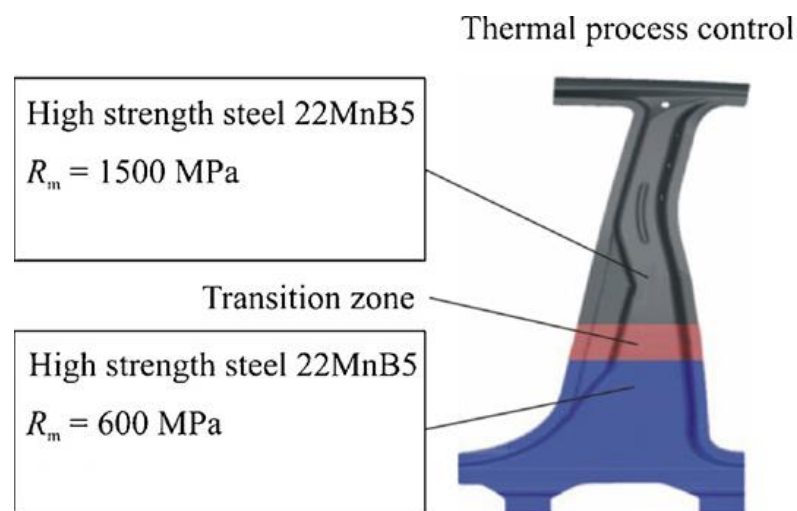


Figura 13: B-pillar con proprietà meccaniche differenziate.

Oltre ai convenzionali parametri della formatura a freddo, parametri termici ed evoluzioni microstrutturali complicano la descrizione dei fenomeni meccanici e fisici presenti nello stampaggio a caldo.

La produzione di componenti in acciaio alto resistenziali con le proprietà desiderate, nello stampaggio a caldo, richiede una profonda conoscenza e controllo del processo di formatura. In questo modo le proprietà finali del componente diventano prevedibili e regolabili sulla base dei diversi parametri del processo e la loro iterazione.

Capitolo 3

PIN ON DISK TEST

Il processo a caldo di riferimento è lo stampaggio di fogli in acciaio al boro alto resistenziale per la produzione di componenti automobilistici.

Dati relativi alla durata delle diverse fasi del processo, che sono stati successivamente utilizzati per il set up e il relativo test, sono stati registrati durante le prove industriali in un impianto di stampaggio a caldo.

Il processo industriale comincia con un riscaldamento della lamiera in un forno a temperatura maggiore di quella di austenizzazione dell'acciaio e il successivo trasferimento alla pressa di formatura per mezzo di un braccio robot in circa 5-10 s. Gli stampi vengono chiusi e in contemporanea avviene la formatura e la tempra del pezzo che richiede all'incirca 20 s. Infine le matrici vengono aperte e il componente estratto in un intorno di 15 s.

Pertanto in media il ciclo di formatura (termico e meccanico) a cui sono sottoposti gli stampi ha un periodo di 35 s.

Solitamente gli stampi vengono sostituiti ogni 200000 cicli, ma dopo una produzione di 2000-3000 pezzi è prevista una revisione.

Tramite il pin on disk test è possibile studiare in laboratorio l'usura a cui sono sottoposti gli stampi senza dover ricorrere a più costose prove industriali. Questa prova permette infatti di riprodurre le condizioni all'interfaccia tra gli stampi e la lamiera, replicando le sollecitazioni termiche e meccaniche alle quali sono sottoposti ciclicamente gli stampi.

Le analisi sono state eseguite su tre tipologie diverse di acciai, l'acciaio AISI H11, usato convenzionalmente per la realizzazione degli stampi, e gli acciai di nuova generazione HTCS1® e HTCS3®, sottoposte a scorrimento a caldo contro lamiere in acciaio 22MnB5 protette da ossidazione e decarburazione tramite il rivestimento alluminio-silicio. Per l'acciaio AISI H11 le prove sono anche state condotte contro lamiere in acciaio 22MnB5 con rivestimento protettivo a base di zinco.

A intervalli prefissati sono state eseguite scansioni con microscopio elettronico SEM e analisi 3D con profilometro ottico per valutare i meccanismi di usura.

3.1 Apparato strumentale

La macchina utilizzata per tali test è un Microtribometro modello UMT-2 della CETR(vedi figura 14), che permette di svolgere prove su materiali ferrosi e non, “a secco” o in condizioni di lubrificazione, tramite una varietà di test abbastanza ampia:

- Pin on Disc
- Ball on Disc
- Pin on V-block
- Block on ring
- Disc on disc (flat on flat)



Figura 14: Immagine di un microtribometro e relativo PC.

La configurazione utilizzata per i test è la pin on disk con un forno di riscaldamento a resistenza per effettuare prove di usura a temperature elevate.

Il pin on disk test prevede che un campione, il pin, venga fatto strisciare su un campione inferiore a forma di disco in lamiera 22MnB5 in questo caso, che è in rotazione solidale al motore elettrico inserito in un forno che consente di testare temperature fino a 1000°C come mostrato in figura 15.

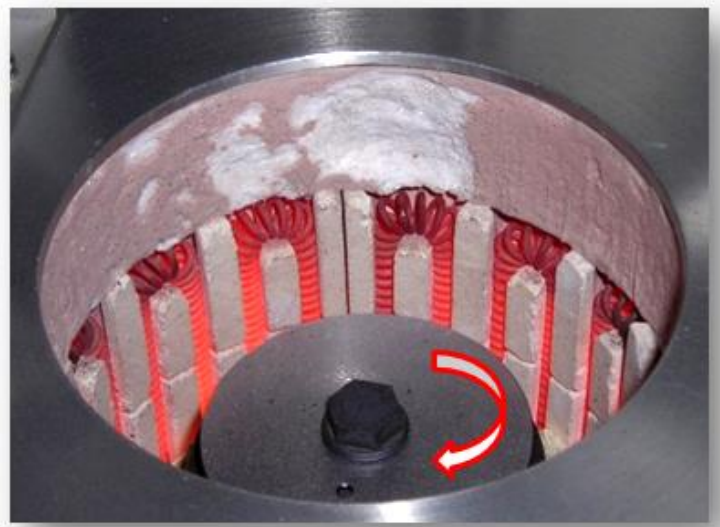


Figura15: Lamiera montata sul cilindro rotante all'interno del forno di riscaldamento.

L'UMT permette il monitoraggio durante la prova della temperatura del forno e del carico normale F_N , coefficiente μ e forza di attrito F_R (vedi figura 16). La temperatura del pin viene invece rilevata da un modulo a parte tramite una termocoppia di tipo K inserita nell'apposita cava interna.

Il pin è collocato in un sistema verticale a colonna, che si muove linearmente dall'alto verso il basso (e viceversa) con una corsa massima di 150 mm e da sinistra verso destra (e viceversa) con una corsa massima di 75 mm, vedi figura 17.

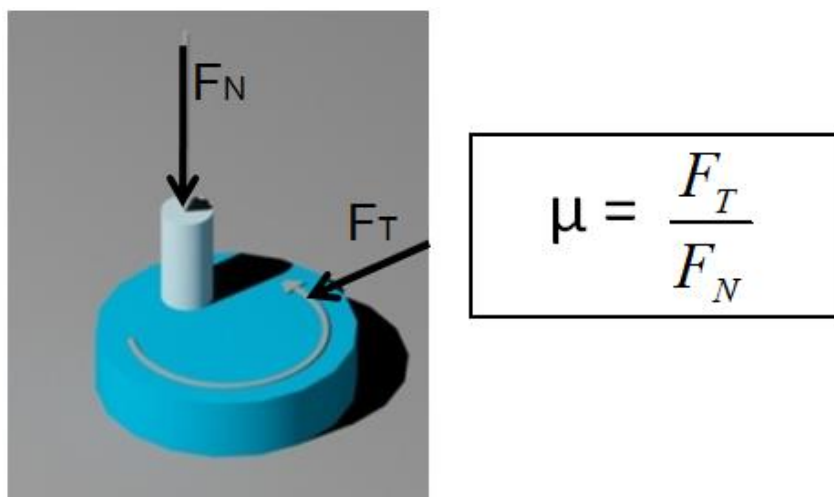


Figura 16: Schematizzazione del pin on disk test e della formula utilizzata per il calcolo del coefficiente d'attrito.

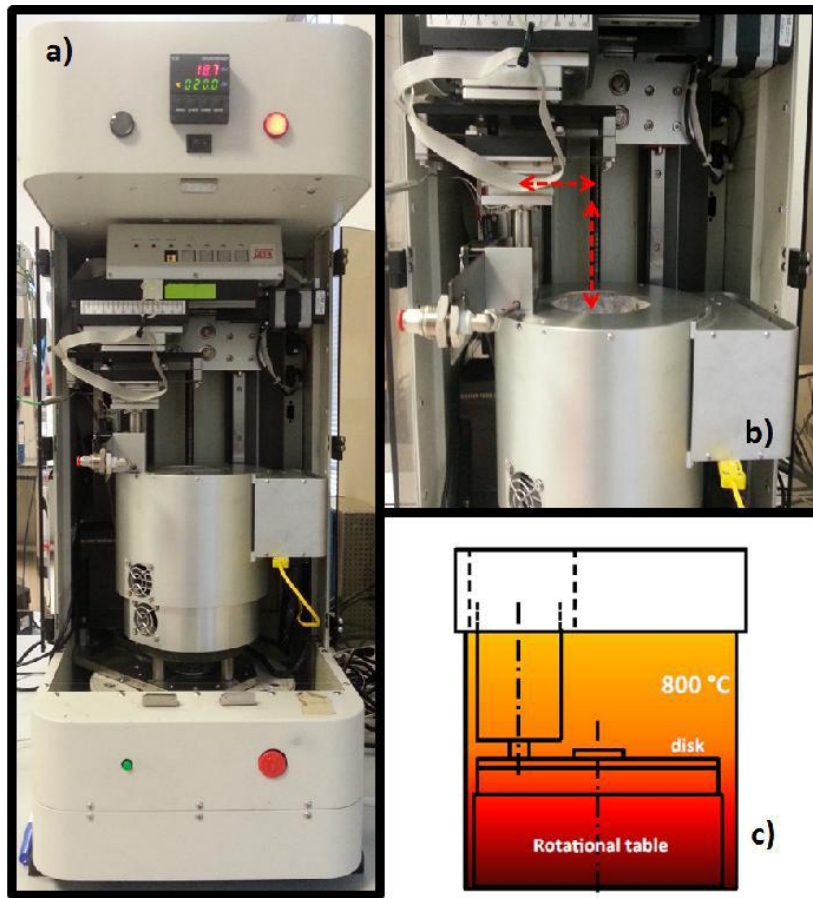


Figura 17: a) Microtribometro utilizzato b) Movimentazioni del pin c) Schema del pin in contatto con la lamiera che ruota ad elevate temperature.

Tabella 2: Specifiche tecniche dell'apparato strumentale.

Massima forza normale 1000 N

Velocità di rotazione 3000 giri/min

Massima distanza di scorrimento in verticale 150 mm

Massima distanza di scorrimento in orizzontale 75 mm

Massima temperatura del forno 1000 °C

Sensori di alta precisione permettono di effettuare misure simultanee in due assi (F_x e F_z) per calcolare il coefficiente d'attrito durante la prova.

La procedura di prova è completamente automatizzata e si appoggia ad una piattaforma PC per il controllo del motore, della movimentazione degli assi e per l'acquisizione dei dati, con un pratico software utilizzabile in ambiente Windows. I dati relativi alla prova possono essere visualizzati in tempo reale o salvati per una visualizzazione futura.

Un sensore di temperatura si trova all'interno del forno(vedi figura 18) il quale, collegato al PC, ne fornisce il controllo e la regolazione.

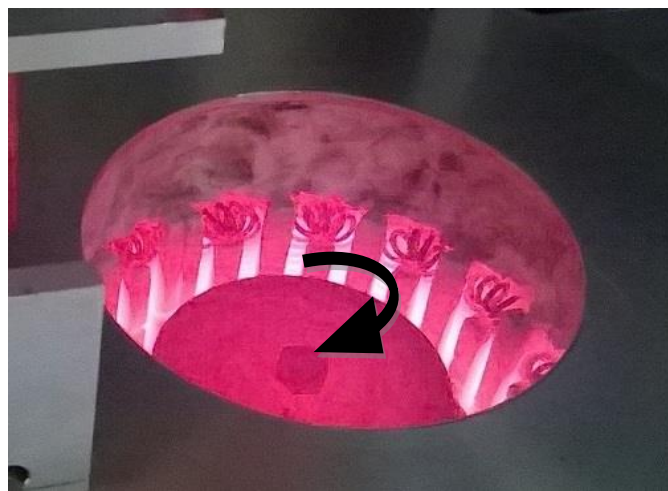


Figura 18: Lamiera montata sul cilindro rotante all'interno del forno di riscaldamento regolato a 800°C.

3.2 Caratterizzazione dei materiali

I pin testati in questa prova sono realizzati in tre acciai differenti: l'acciaio AISI H11 e gli acciai di nuova generazione HTCS3®, pensato principalmente per l'utilizzo nel processo di stampaggio a caldo indiretto, e HTCS1®, per lo stampaggio diretto.

Tali acciai vengono utilizzati poiché riescono a mantenere una elevata durezza alle elevate temperature di esercizio a cui sono sottoposti e garantiscono anche una sufficiente tenacità alla frattura, necessaria per evitare il pericolo di rotture causate dagli urti che si hanno nello stampaggio.

I dischi di lamiera (vedi figura 19) utilizzati sono in acciaio alto-resistenziale 22MnB5 ricoperti da un rivestimento alluminio-silicio (Usibor® 1500) da uno a base di zinco.

Tali rivestimenti vengono depositati sulle lamiere vergini per diminuire l'usura sugli stampi, incrementare la resistenza alla corrosione ed evitare la decarburazione delle stesse.

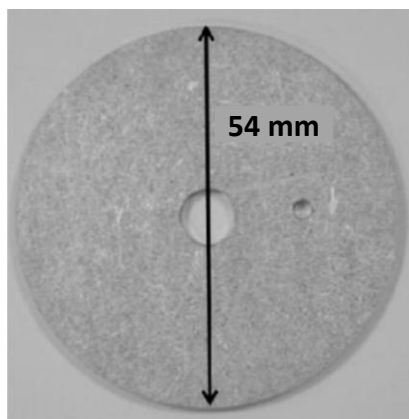


Figura 19: Dischi in 22mnB5 rivestiti utilizzati nel pin on disk test.

Il foro centrale serve per ancorare le lamiere al cilindro rotante, il foro minore per impedire, mediante una spina, il moto relativo tra lamiera e cilindro di supporto sottostante.

Tabella 3: Composizione chimica dell'acciaio dei pin e dello substrato delle lamine utilizzate.

	C	Mn	Cr	Si	Mo	V
H11	0,38	0,40	5,00	1,10	1,30	0,40
HTCS1®	/	/	/	/	/	/
HTCS3®	/	/	/	/	/	/

	C	Mn	Cr	Si	B
22MnB5	0,22	1,40	0,30	0,35	0,005

Per gli acciai HTCS1® e HTCS3®, poiché ancora in via di sviluppo, non sono stati forniti dati relativi alla composizione chimica.

I pin sono di geometria cilindrica e presentano un foro per l'alloggiamento della termocoppia per monitorare la temperatura (figura 20 e 21).

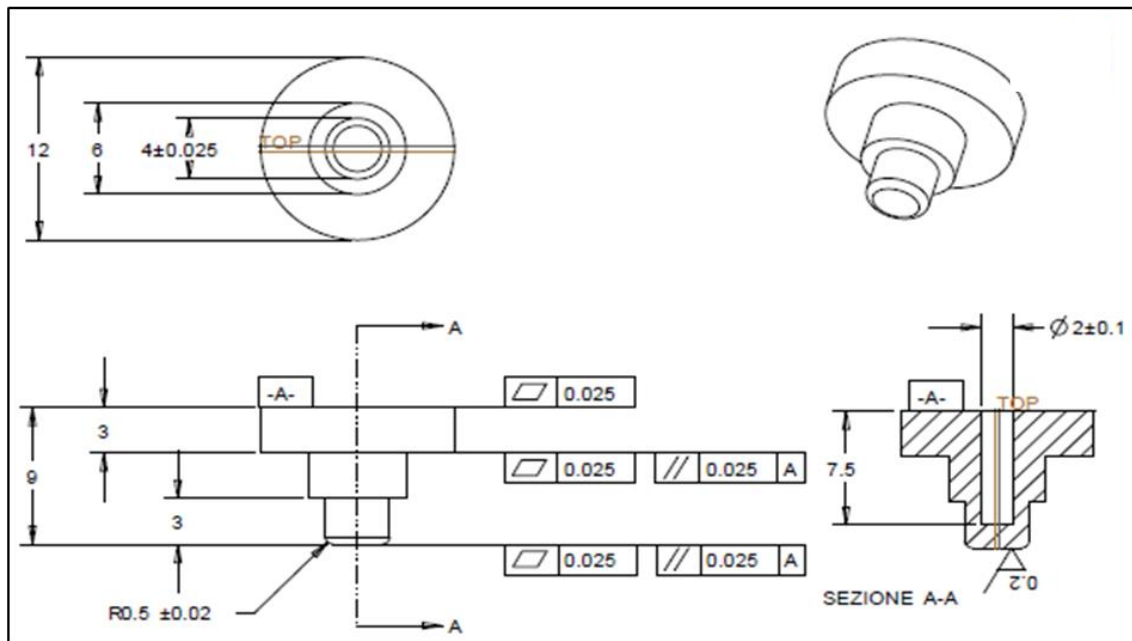


Figura 20: Schema della geometria del pin cilindrico.

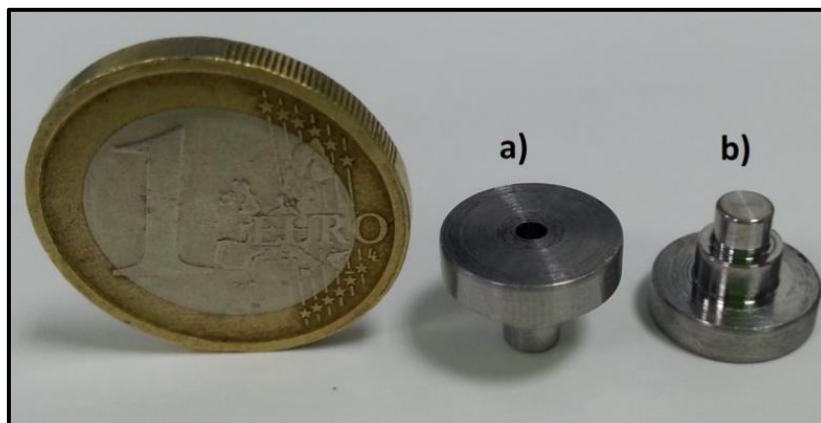


Figura 21: a) Foro per inserire termocoppia b) pin cilindrico rapportati ad una moneta.

3.3 Strategia sperimentale adottata

Si vuole studiare l'evoluzione dell'usura dei pin sottoposti ad una determinata pressione di contatto, velocità di strisciamento e temperatura della lamiera, da vergini fino al compimento di 2000 cicli, con analisi intermedie a 200, 600 e 1200 cicli.

Prima dell'inizio della prova(vedi figura 22) il pin viene fissato ad una sospensione collegata alla cella di carico per la rilevazione delle forze tangenziali e normali. La termocoppia viene collegata al modulo dedicato alla registrazione della temperatura del pin e ne monitora l'andamento con frequenza di 10Hz per tutta la durata del test.

La lamiera viene montata sul cilindro di supporto posto all'interno del forno, si imposta la temperatura d'obiettivo (600°C, 700°C o 800°C) e si aspetta che il forno si stabilizzi.

Raggiunta la temperatura voluta si può far partire il test che consiste nelle seguenti quattro fasi:

1. *FASE D'INGRESSO*: il pin dalla posizione di partenza si porta sopra al disco e inizia a scendere per entrare nel forno e portarsi in prossimità della lamiera, vedi figura 23. Durata: 6 secondi;
2. *FASE DI CONTATTO*: la lamiera inizia a ruotare a una velocità prefissata, il pin vi si avvicina lentamente e si porta in contatto agendo con una forza normale costante. In questa fase i sensori della cella di carico registrano i dati. Durata: 12 secondi;
3. *FASE D'USCITA*: il pin si muove verso l'alto uscendo dal forno. Durata: 3,8 secondi;
4. *FASE DI RAFFREDDAMENTO*: il pin ritorna nella posizione di partenza in prossimità dell'ugello da cui fuoriesce aria compressa. Durata: 15 secondi;

Un ciclo completo dura per un totale di 36,8 secondi, in linea con le tempistiche a cui è sottoposto uno stampo in un processo di stampa a caldo di una lamiera.

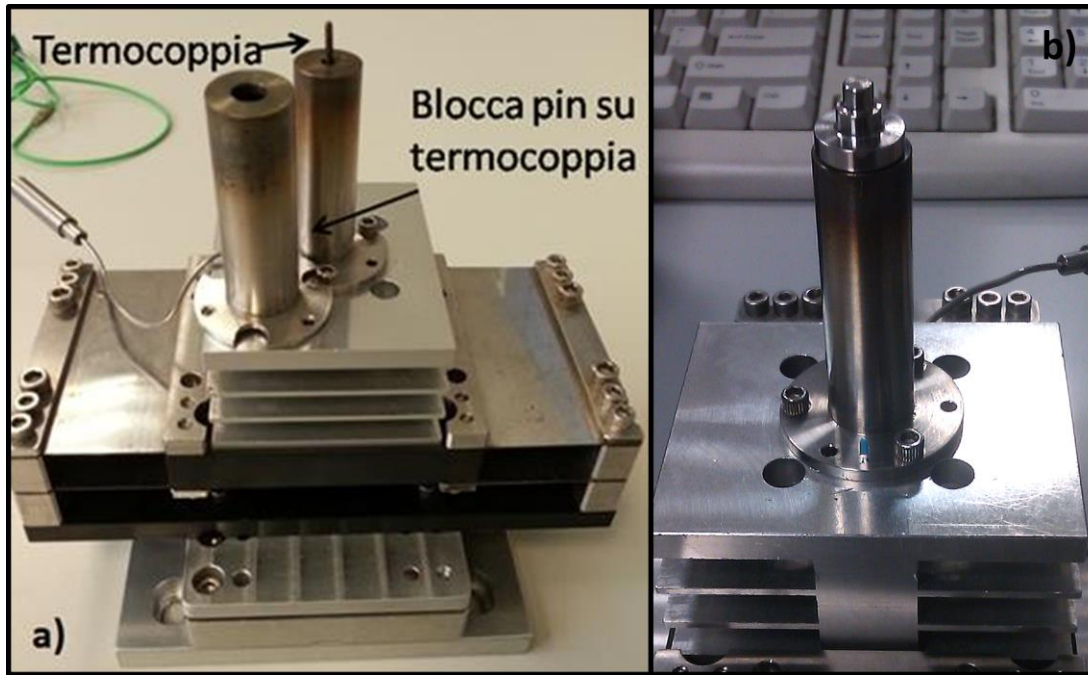


Figura 22: a) sistema di bloccaggio del pin con termocoppia e cella di carico b) pin alloggiato sopra la termocoppia.

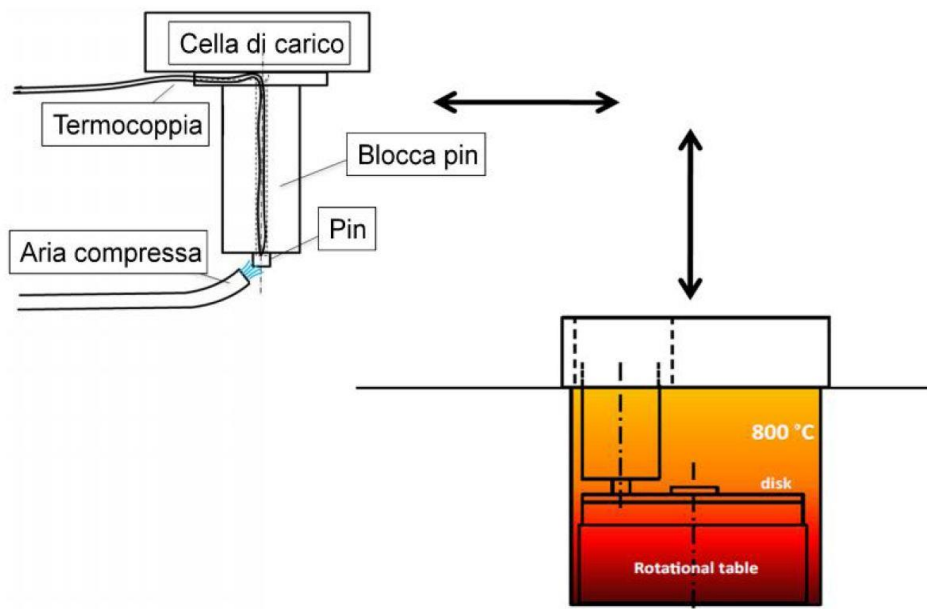


Figura 23: Schema della movimentazione del pin dalla posizione iniziale in prossimità dell'ugello al contatto e viceversa.

Parametri di processo:

- Carico normale: $50(\pm 2)$ N, pari ad una pressione di circa $7(\pm 0,1)$ MPa per un'area di contatto del pin pari a $7,07 \text{ mm}^2$;
- Durata dello strisciamento tra pin e lamiera: 5 secondi;
- Pressione dell'aria compressa in uscita dall'ugello: 4 bar;
- Raggio di strisciamento del pin sulla lamiera: 15, 19 o 23 mm per un totale di tre piste per lamiera;
- Velocità di strisciamento: 15 mm/s (quindi velocità di rotazione pari a 9,55, 7,54 o 6,23 giri/minuto rispettivamente per il raggio di strisciamento pari a 15, 19 o 23 mm);
- Velocità di riscaldamento: $0.44 \text{ }^\circ\text{C/s}$ mantenuti costanti indifferentemente dalla temperatura obiettivo.

Prima dell'inizio di ogni prova è stata eseguita un'analisi al microscopio elettronico a scansione SEM(vedi figura 24) e al profilo metro ottico per determinare le condizioni tribologiche della superficie dei pin. Inoltre ogni pin è stato pesato da vergine prima di ogni test.



Figura 24: Microscopio elettronico a scansione SEM presente nel laboratorio Te.Si. di Rovigo.

Tabella 4: Rugosità media dei pin ricavate tramite software dalle scansioni al profilometro.

Rugosità media Sa pin H11	8,371 μm
Rugosità media Sa pin HTCS1®	4,750 μm
Rugosità media Sa pin HTCS3®	5,380 μm

I primi 200 cicli sono stati suddivisi in step da 50 cicli per pista, i restanti 1800 in step da 100 cicli.

A 200, 600, 1200 e 2000 cicli sono stati interrotti i test per effettuare delle analisi tramite profilometro ottico e microscopio a scansione SEM, al fine di valutare le condizioni tribologiche della superficie di contatto dei pin, e per pesare i campioni usurati.

Capitolo 4

ANALISI DEI RISULTATI

Come prima cosa sono stati condotti test e analisi sulle lamiere in acciaio 22Mnb5 rivestite da AlSi e da Zn, analizzando la loro rugosità e diffusione al variare del ciclo termico a cui sono sottoposte.

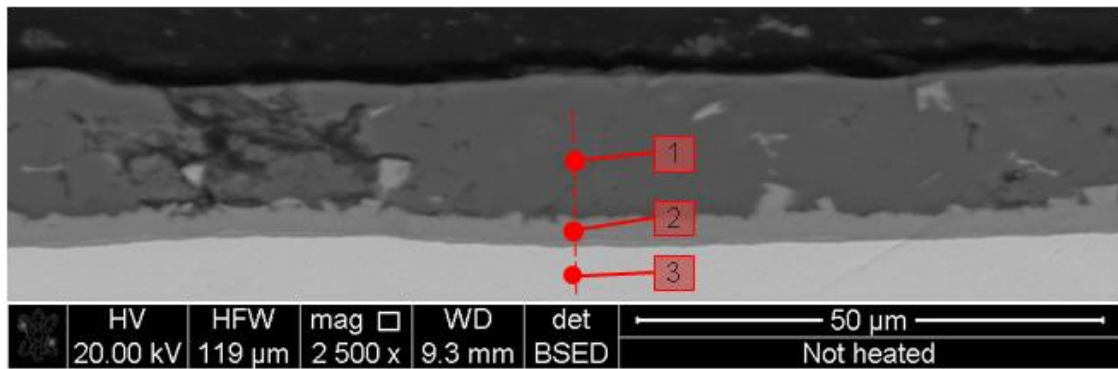
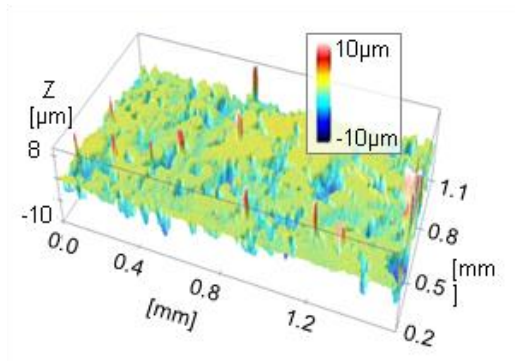
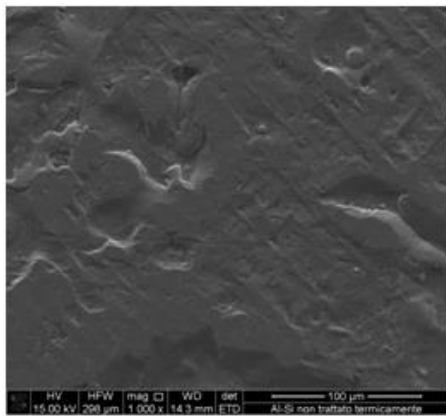
Successivamente si riportano i risultati ricavati dalle prove pin on disk, per i tre acciai analizzati H11, HTCS1® e HTCS3®, in termini di coefficiente d'attrito, parametri termici, perdite di peso e variazioni della superfici di contatto dovuta all'usura.

4.1 Analisi lamiere 22MnB5

L'acciaio maggiormente utilizzato per le applicazioni a caldo è il 22MnB5. In fase di stampaggio al fine di evitare l'ossidazione dovuta al contatto con l'aria successiva alla fase di riscaldamento, l'acciaio viene rivestito con uno strato protettivo.

Gli strati protettivi sono due: lo standard AlSi e un nuovo Zn applicati tramite processo di deposizione galvanica.

Nelle figure 25 e 26 sono rappresentate le immagini al SEM con le relative immagini al profilometro ottico e un'analisi EDS puntiforme dello strato di rivestimento non sottoposto a nessun ciclo termico.

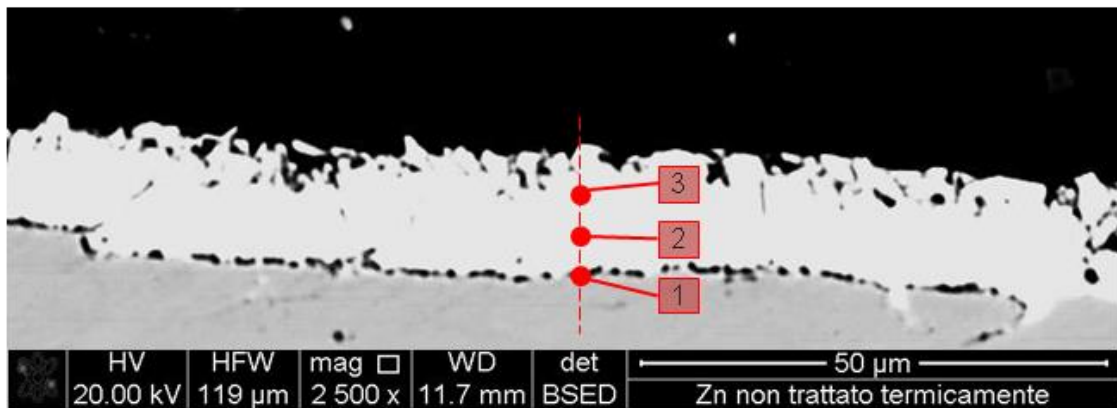
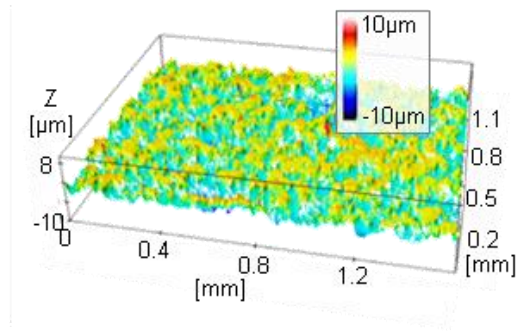
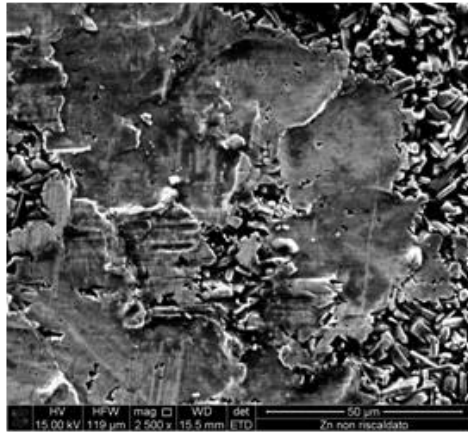


PUNTO 1	
Element	Weight %
Al	93,78
Si	6,11
Fe	0,11

PUNTO 2	
Element	Weight %
Al	58,26
Si	12,23
Fe	29,51

PUNTO 3	
Element	Weight %
Al	1,37
Si	0,26
Fe	98,37

Figura 25: Foto SEM, immagine Profilometro Ottico, Analisi EDS puntiforme strato di AlSi su 22MnB5.



PUNTO 1	
Element	Weight %
Zn	85,15
Fe	14,85

PUNTO 2	
Element	Weight %
Zn	90,73
Fe	9,27

PUNTO 3	
Element	Weight %
Zn	92,69
Fe	7,31

Figura 26: Foto SEM, immagine Profilometro Ottico, Analisi EDS puntiforme strato di Zn su 22MnB5.

Durante il processo di stampaggio a caldo la lamiera è sottoposta a un ciclo termico che attiva la diffusione atomica tra gli elementi e ne modifica la morfologia superficiale dello strato. Per studiare tale comportamento si sono effettuati test di riscaldamento attraverso il thermo-mechanical simulator GLEEBLE 3800.

I test prevedevano un riscaldamento per effetto Joule dei provini di lamiera, un mantenimento per ottenere una completa omogeneizzazione della struttura e un successivo raffreddamento tramite aria.

La tabella 5 riassume i parametri del piano sperimentale delle prove effettuate.

Heating temperature [°C]	Heating rate [°C/s]	Soaking time [s]	Cooling rate [°C/s]
700, 800, 850, 900, 950 (±0.1)	10.0 (±0.1)	60; 120; 180; 240; 300 (±0.1)	40 (±1)

Tabella 5: Parametri di Riscaldamento, Mantenimento, Raffreddamento del piano sperimentale delle prove.

Le figure 27 e 28 mostrano l'influenza della temperatura di riscaldamento e del tempo di mantenimento sul processo di diffusione sui provini AlSi e Zn valutata attraverso analisi EDS.

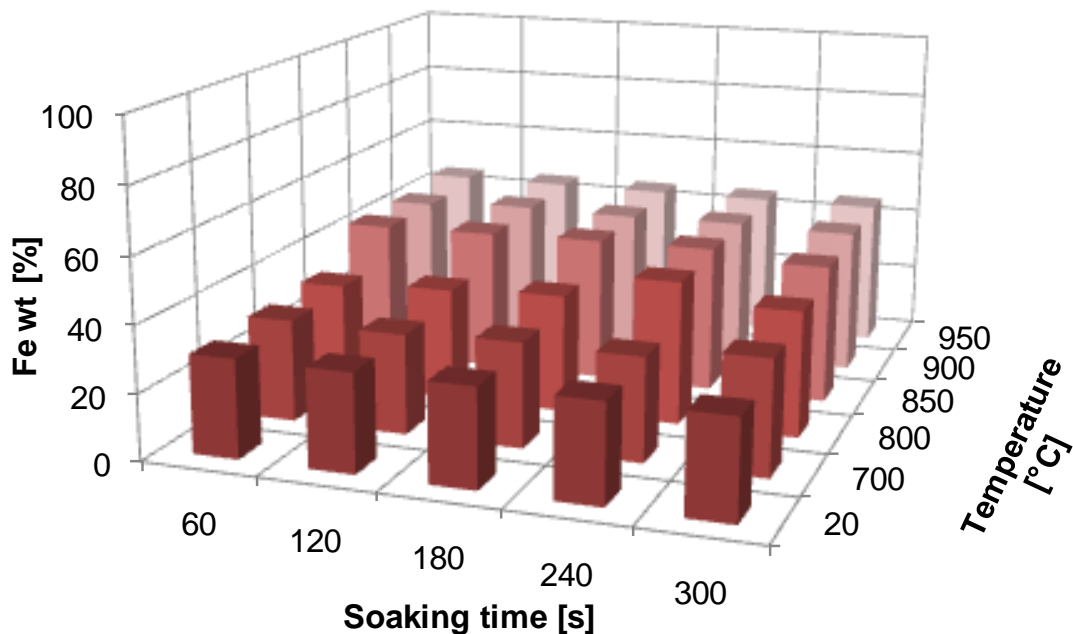


Figura 27: Diffusione del Fe in termini di weight% nel rivestimento AlSi al variare della temperatura e tempo di mantenimento.

Nei provini con rivestimento AlSi si nota che sia la temperatura e il tempo di mantenimento influenzano i fenomeni diffusivi. A 700°C la diffusione si attiva e il Fe inizia a diffondersi nello strato del rivestimento dando origine a una lega ternaria Fe-Al-Si.

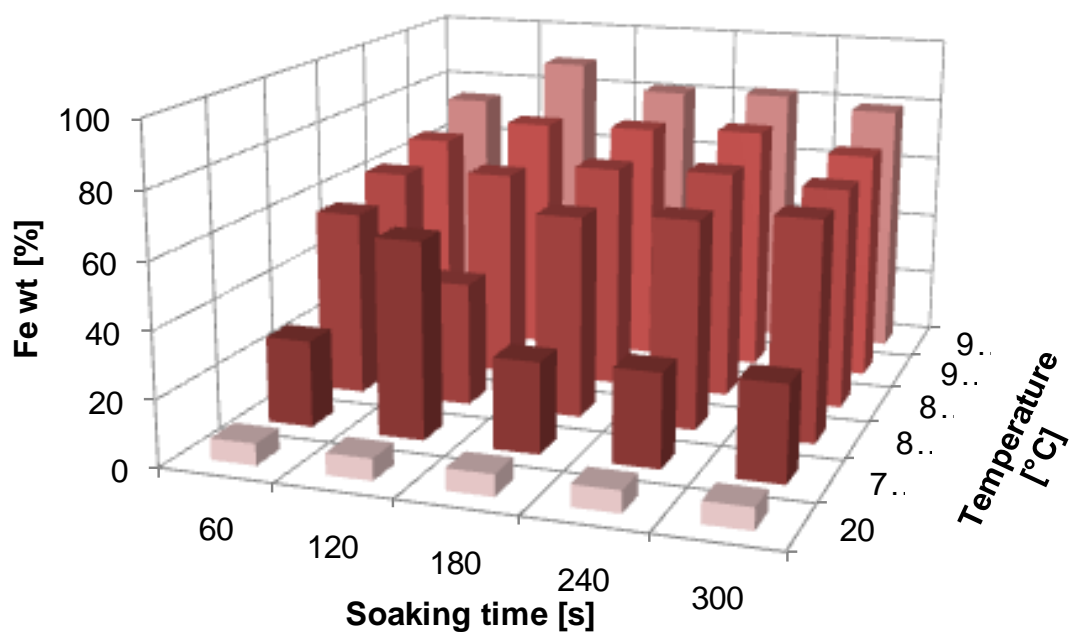


Figura 28: Diffusione del Fe in termini di weight% nel rivestimento Zn al variare della temperatura e tempo di mantenimento.

Per quanto riguarda i provini rivestiti con Zn la temperatura è il parametro più influente: maggiore è la temperatura, maggiore è la diffusione del Fe nel rivestimento.

Il tempo di mantenimento invece rappresenta un aspetto trascurabile.

Oltre alla diffusione atomica, il processo di stampaggio a caldo, comporta una modifica della morfologia dello strato di rivestimento legata a una diversa rugosità superficiale.

Nelle figure 29 e 30 sono rappresentate le immagini al SEM della superficie dei provini rivestiti con AlSi e con Zi e la relativa rugosità al variare della temperatura di riscaldamento.

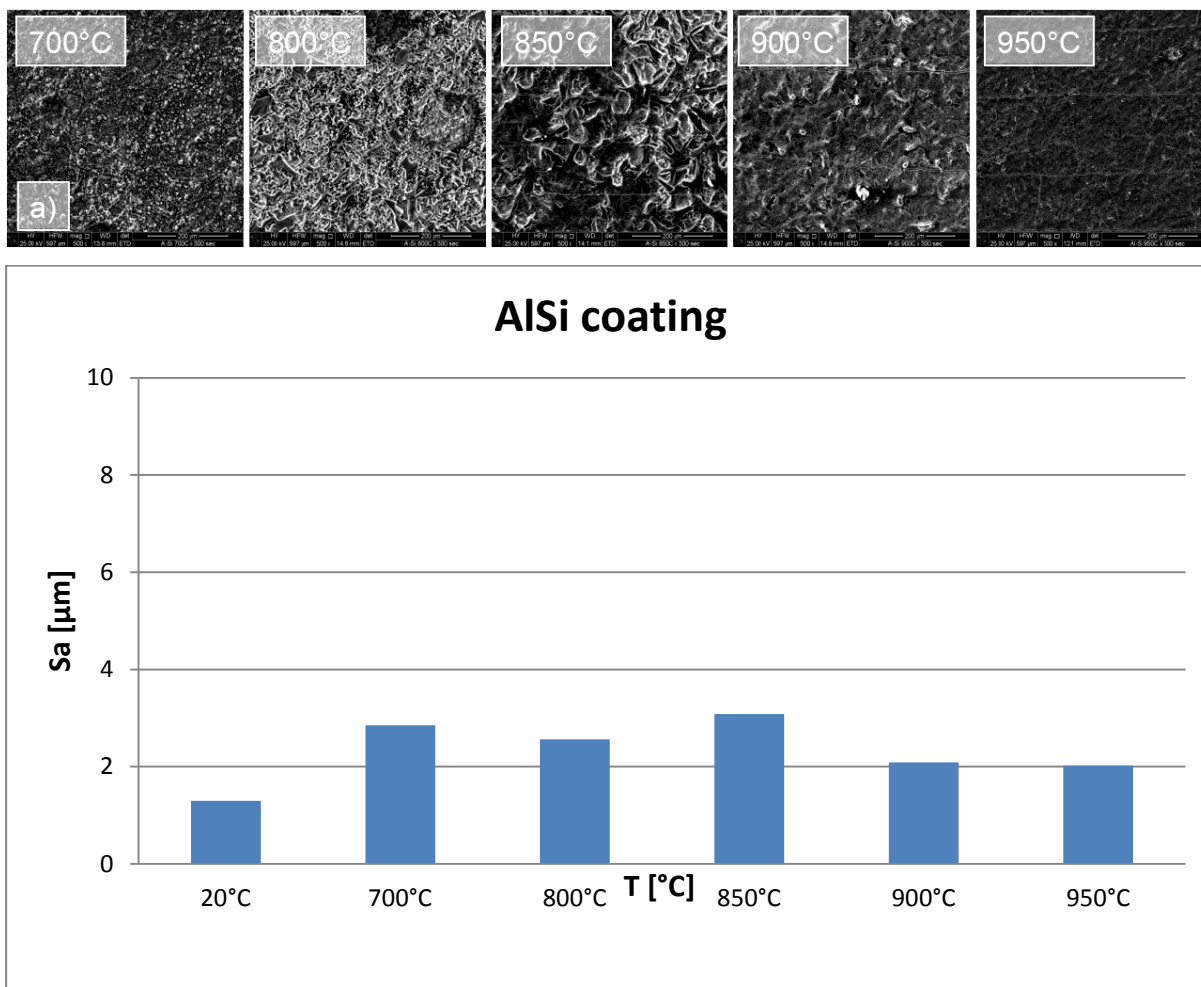


Figura 29: Immagini al SEM e andamento rugosità del rivestimento AlSi all'aumentare della temperatura.

Dall'osservazione delle immagini di figura 29 si può notare un aumento di rugosità fino a 700°C dove inizia la diffusione per poi mantenersi relativamente stabile.

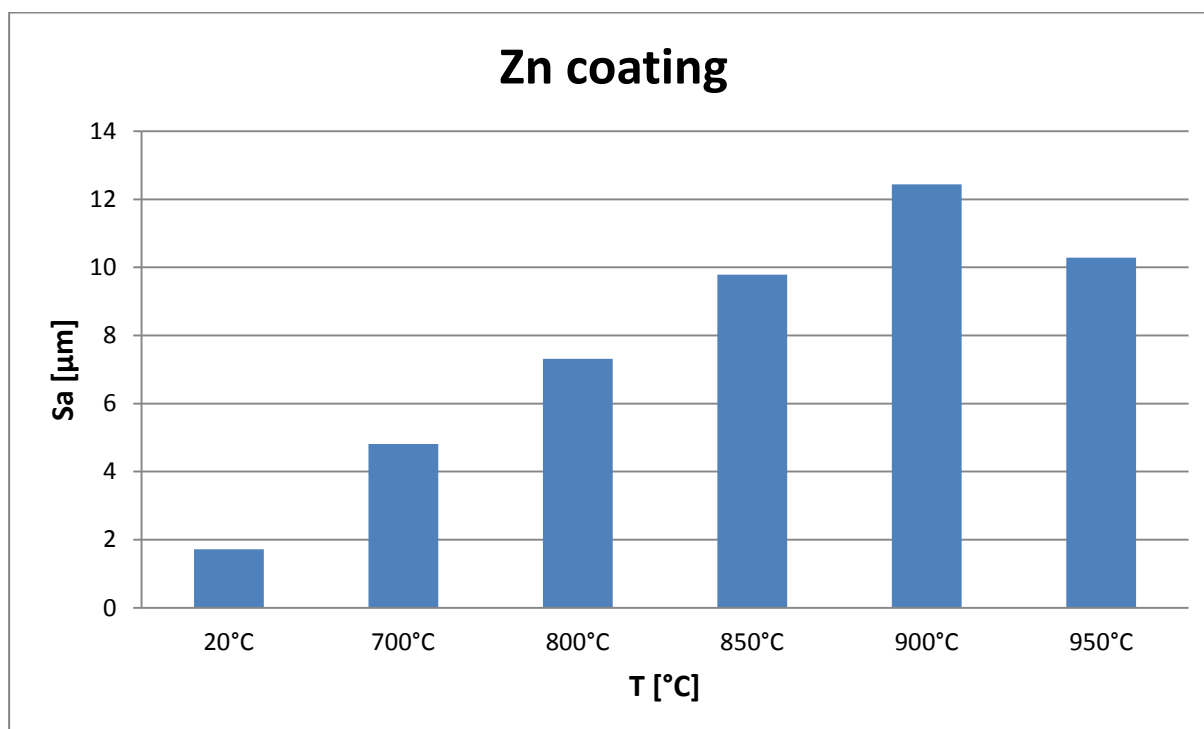
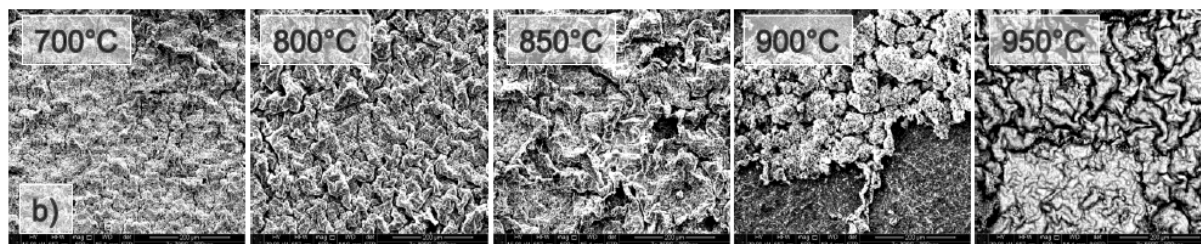


Figura 30: Immagini al SEM e andamento rugosità del rivestimento Zn all'aumentare della temperatura.

Dall'osservazione delle immagini di figura 30 si può notare un aumento di rugosità che si protrae oltre alla temperatura di inizio diffusione di 700°C fino ad arrivare a valori superiori a 12 quando lo strato di Zn inizia a bollire. Pertanto tale limite non va superato in fase di austenizzazione.

4.2 Coefficiente d'attrito

Nelle figure 31, 32, 33 e 34 è mostrato l'andamento del coefficiente d'attrito per i tre tipi di acciaio nell'arco dei 2000 cicli alle varie configurazioni di prova dei test pin on disk.

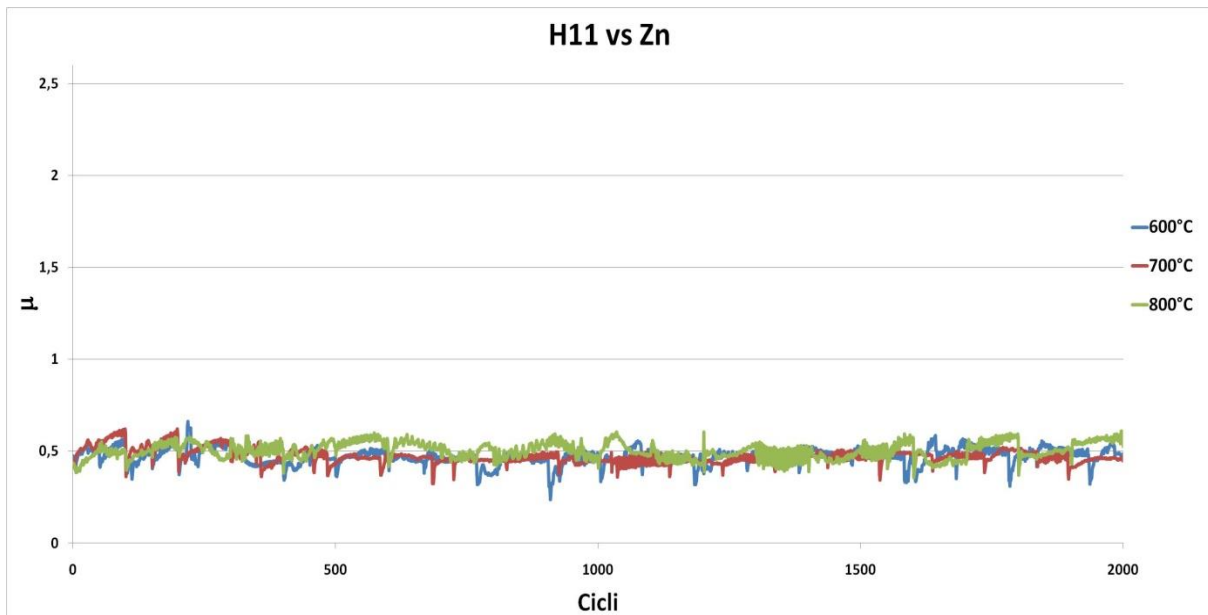


Figura 31: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova H11 vs Zn.

Le deviazioni dal valor medio del coefficiente d'attrito sono da imputarsi ai fenomeni di adesione e abrasione che coinvolgono il rivestimento delle lamiere e la superficie del pin.

Il rivestimento a base di zinco permette di ottenere un coefficiente d'attrito con fluttuazioni contenute e, stando ai risultati ottenuti, a 600 °C è la soluzione che ne offre il valor medio più basso. I picchi che si notano sono probabilmente dovuti alla presenza ossidi sulla superficie della lamiera.

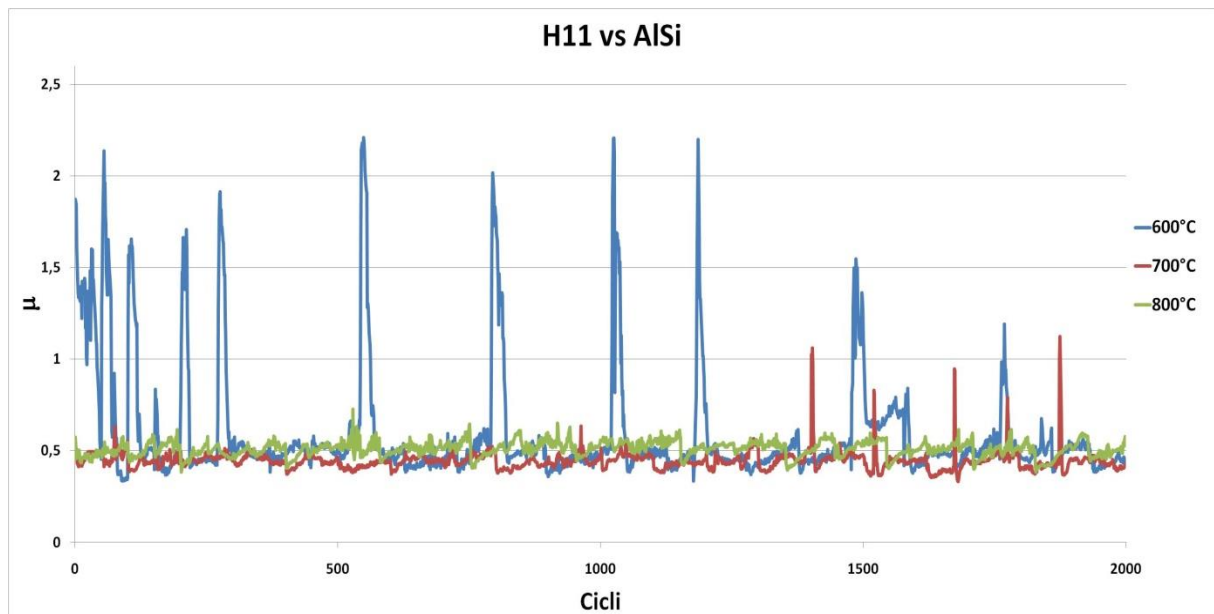


Figura 32: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova H11 vs AISi.

Il pin in acciaio AISI H11 testato contro lamiere con rivestimento di tipo AISi presenta importanti fluttuazioni del valore del coefficiente d'attrito a 600 °C (e in minor parte anche a 700 °C), presumibilmente causate da fenomeni di usura adesiva. Tuttavia, tra i tre casi testati contro lamiere di questo tipo, l'acciaio AISI H11 a 700 °C ha il più basso numero di picchi e il valore medio di coefficiente d'attrito minore in assoluto.

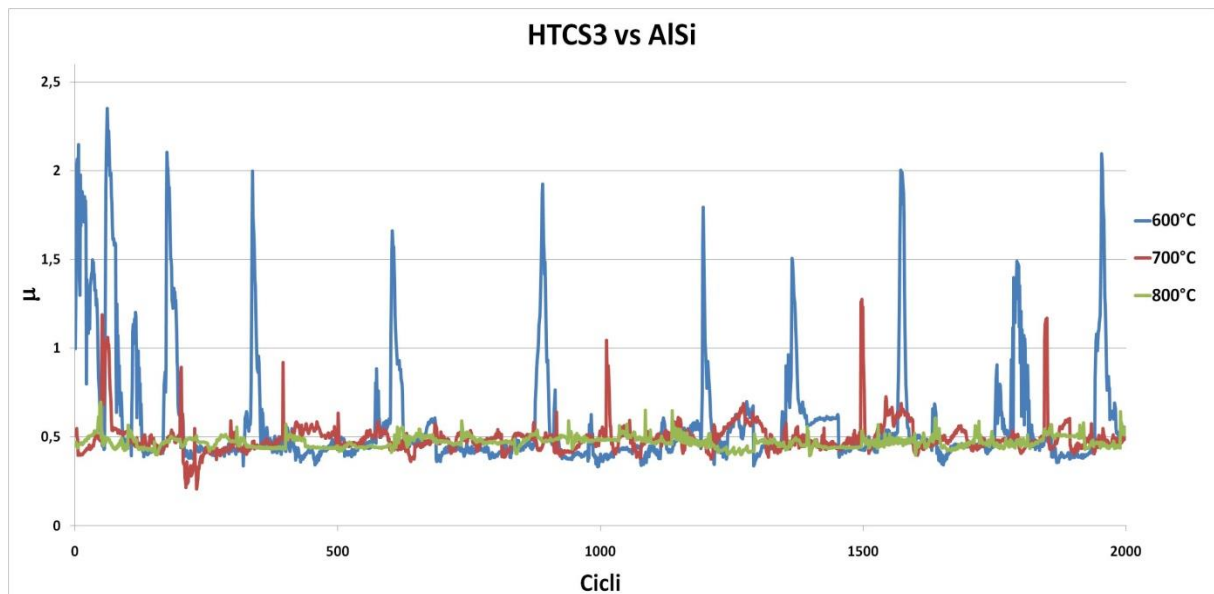


Figura 33: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova HTCS3® vs AISi.

Le prove eseguite con pin in acciaio HTCS3® evidenziano un andamento del coefficiente d'attrito a 800 °C più stabile rispetto agli altri casi, accompagnato dal minore valore medio per questa temperatura di esercizio. Ciononostante, a 700 °C e a 600°C sono presenti numerosi picchi e il coefficiente d'attrito ha valori medi rispettivamente maggiore e minore del caso precedentemente analizzato. Si può ragionevolmente ipotizzare che le cause di questo comportamento siano le stesse del caso precedente.

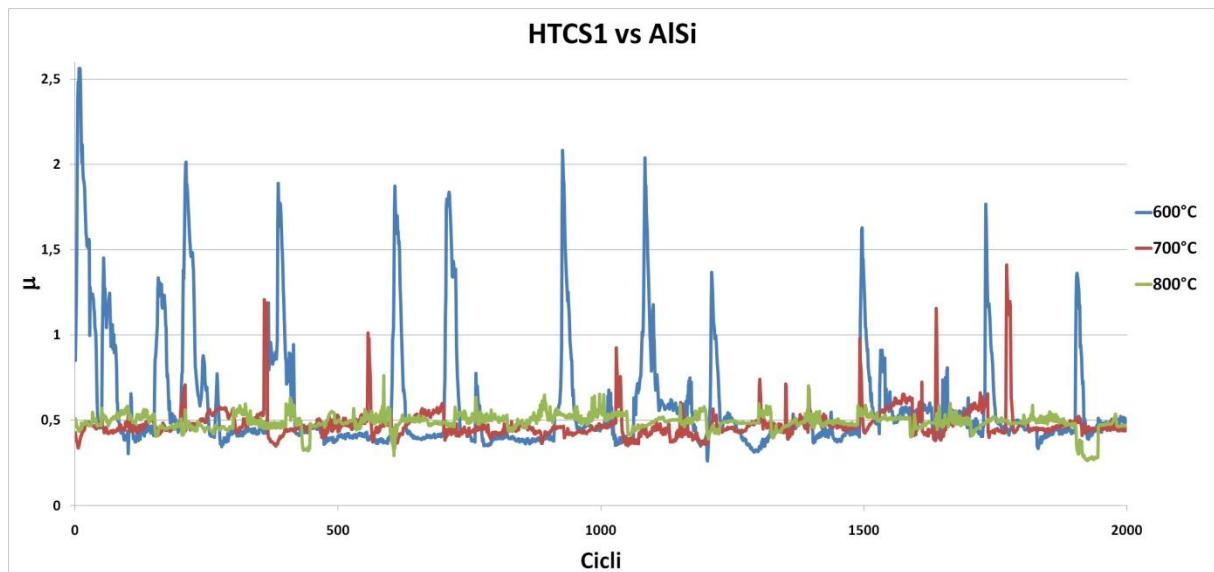


Figura 34: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova HTCS1® vs AISi.

Infine, anche i pin in acciaio HTCS1® presentano andamenti con numerosi picchi del coefficiente d'attrito a 600 °C e 700 °C, probabilmente causati anche in questi casi dall'usura adesiva. I valori medi del coefficiente d'attrito misurati alle varie temperature sono compresi tra quelli ottenuti per l'acciaio AISI H11 e per l'acciaio HTCS3®.

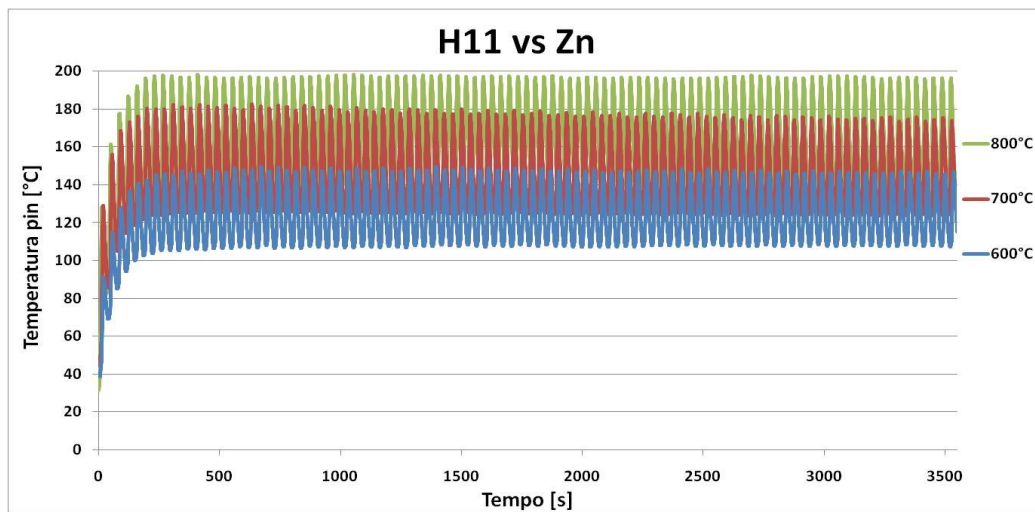
I valori del coefficiente d'attrito estrapolati durante le prove sono riassunti in tabella 6.

	H11 vs Zn	H11 vs AISi	HTCS3® vs AISi	HTCS1® vs AISi
600 °C	0,4715	0,5964	0,5845	0,5917
700 °C	0,4721	0,4449	0,4923	0,4768
800 °C	0,5024	0,5092	0,4704	0,4901

Tabella 6: Valore medio del coefficiente d'attrito nelle varie configurazioni di prova.

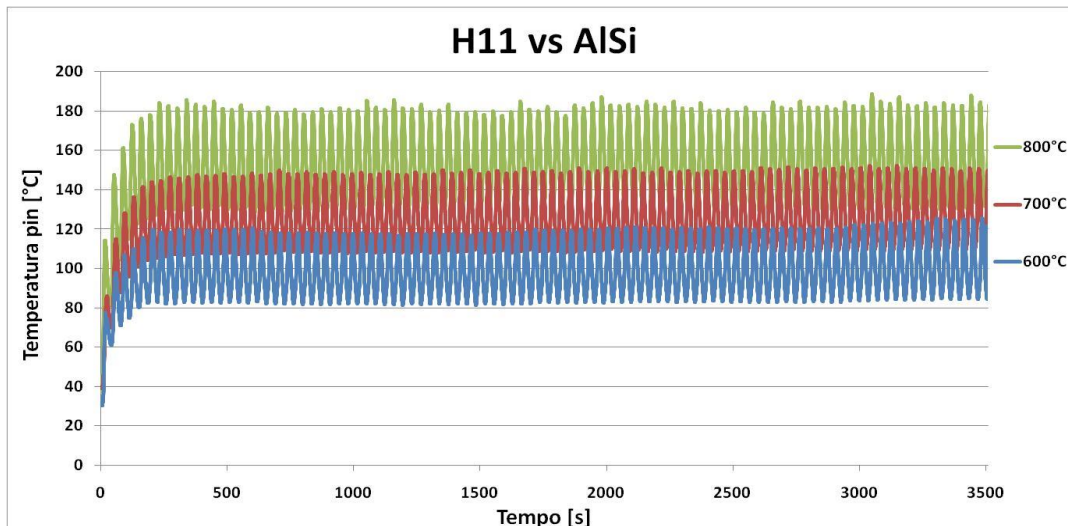
4.3 Parametri termici

Nelle figure 35, 36, 37 e 38 è mostrato l'andamento della temperatura dei pin durante l'esecuzione di 100 dei 2000 cicli svolti nelle varie configurazioni testate. È sempre presente un regime transitorio iniziale della durata di qualche minuto prima che il ciclo termico si stabilizzi.



Temperatura lamiera	T media	ΔT
600 °C	123,74 °C	45,75 °C
700 °C	146,69 °C	59,02 °C
800 °C	161,85 °C	63,25 °C

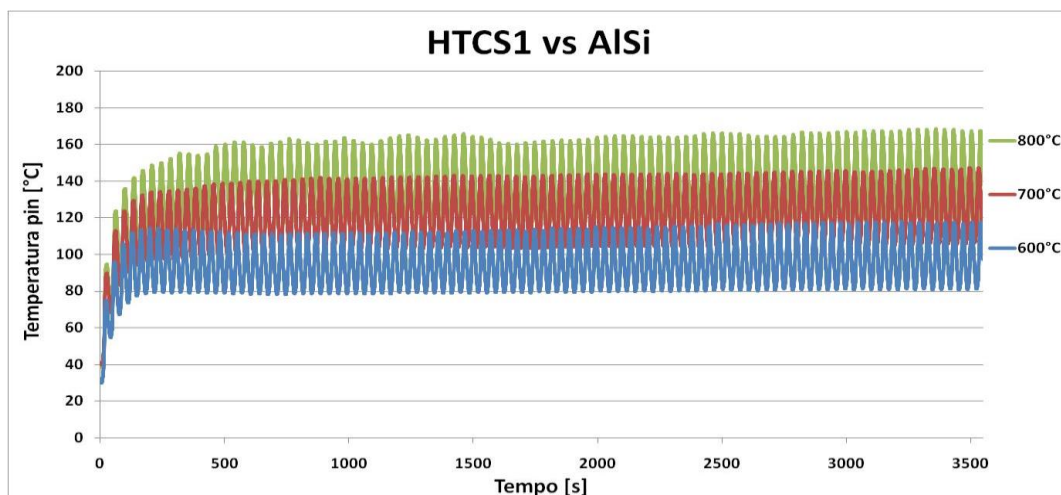
Figura 35: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione H11 vs Zn.



Temperatura lamiera	T media	ΔT
600 °C	100,24 °C	43,95 °C
700 °C	126,51 °C	46,88 °C
800 °C	152,81 °C	60,34 °C

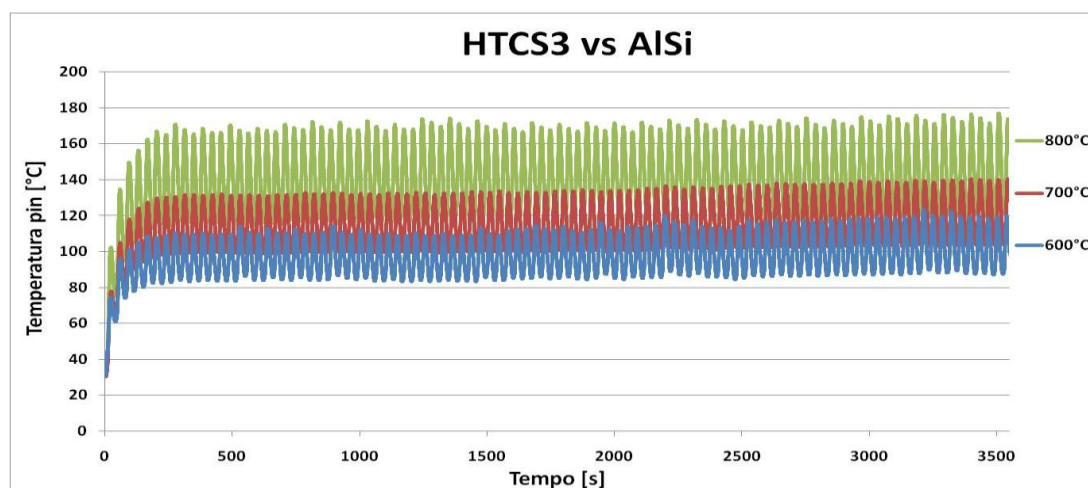
Figura 36: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione H11 vs AISi.

A regime si osserva che i pin testati contro lamiere con rivestimento a base di zinco operano a temperature medie più alte rispetto agli stessi pin testati contro lamiere con rivestimento di tipo alluminio-silicio. Inoltre, nonostante i campioni abbiano uguali proprietà termiche essendo fatti dello stesso materiale, a 600 °C e a 700 °C i primi presentano cicli termici di ampiezza maggiore. Una possibile spiegazione potrebbe essere il meccanismo principale di usura presente all'interfaccia. Come si vedrà in seguito, i pin testati contro lamiere con rivestimento a base di zinco alle temperature in questione sono soggetti ad abrasione che causa un aumento della temperatura delle superfici interessate. Viceversa, i pin testati contro lamiere rivestite in alluminio-silicio presentano importanti adesioni che, aumentando lo spessore della superficie, incrementano la quantità di materiale tra la superficie di contatto e la termocoppia, riducendone quindi il valore rilevato.



Temperatura lamiera	T media	ΔT
600 °C	95,30 °C	39,47 °C
700 °C	121,80 °C	49,76 °C
800 °C	137,81 °C	55,30 °C

Figura 37: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione HTCS1® vs AISi.



Temperatura lamiera	T media	ΔT
600 °C	98,28 °C	40,42 °C
700 °C	116,75 °C	41,52 °C
800 °C	141,28 °C	61,86 °C

Figura 38: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione HTCS3® vs AISi.

Interessante è il confronto dei valori delle temperature dei diversi pin nei test con le lamiere rivestite di AISi. Nella tabella 7 sono raggruppati i valori della Temperatura media e ΔT a regime dei test effettuati.

Temperatura lamiera	H11 vs AISi		HTCS1® vs AISi		HTCS3® vs AISi	
	T media	ΔT	T media	ΔT	T media	ΔT
600 °C	100,24 °C	43,95 °C	95,30 °C	39,47 °C	98,28 °C	40,42 °C
700 °C	126,51 °C	46,88 °C	121,80 °C	49,76 °C	116,75 °C	41,52 °C
800 °C	152,81 °C	60,34 °C	137,81 °C	55,30 °C	141,28 °C	61,86 °C

Tabella 7: Temperatura media e ΔT a regime per i casi H11 vs AISi, HTCS1® vs AISi e HTCS3® vs AISi.

Aspetto importante da notare dall'osservazione dei valori delle temperature nei vari casi oggetto di analisi è che la temperatura media a regime nei 100 cicli per gli acciai HTCS1® e HTCS3® è sempre minore di quella misurata per l'acciaio AISI H11. Per quanto riguarda l'ampiezza dei cicli termici invece, le prestazioni differiscono di caso in caso.

A 600 °C gli acciai HTCS1® e HTCS3® presentano un range di temperature inferiore rispetto all'acciaio AISI H11, con valori di ΔT che differiscono tra i due per meno del 3%.

A 700 °C l'acciaio HTCS1® compie cicli termici di ampiezza maggiore all'acciaio AISI H11, mentre l'acciaio HTCS3® presenta un valore di ΔT minore rispetto agli altri materiali.

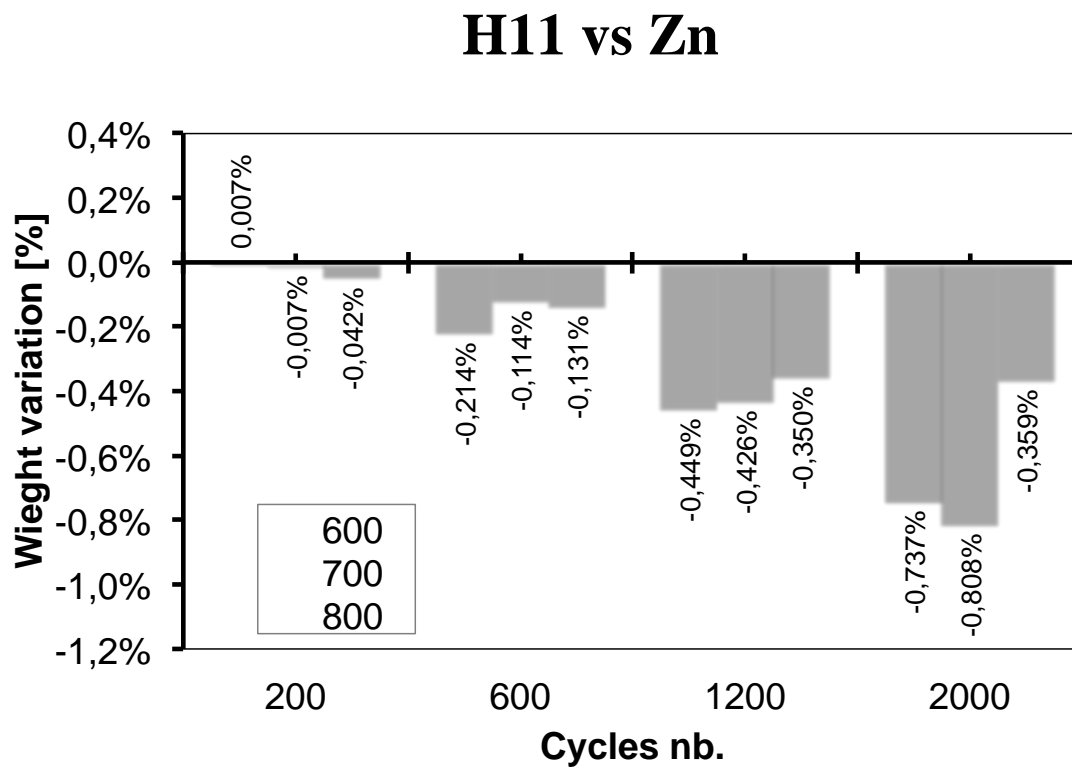
A 800 °C il minore ΔT si riscontra per l'acciaio HTCS1®, mentre gli acciai AISI H11 e HTCS3® hanno valori simili.

Questa disuniformità dei risultati potrebbe essere imputata a differenti quantità di rivestimento delle lamiere che hanno aderito alla superficie di contatto dei pin: si può supporre che a parità di temperatura di esercizio, maggiore è la quantità di materiale frapposta tra la punta della termocoppia e la superficie di contatto, minore è la temperatura rilevata

4.4 Variazioni di peso e dell'area di usura dei pin

I pin oggetto dei test sono stati pesati e analizzati al profilometro ottico dopo 200, 600, 1200 e 2000 cicli per valutare l'evoluzione dell'usura e della rugosità.

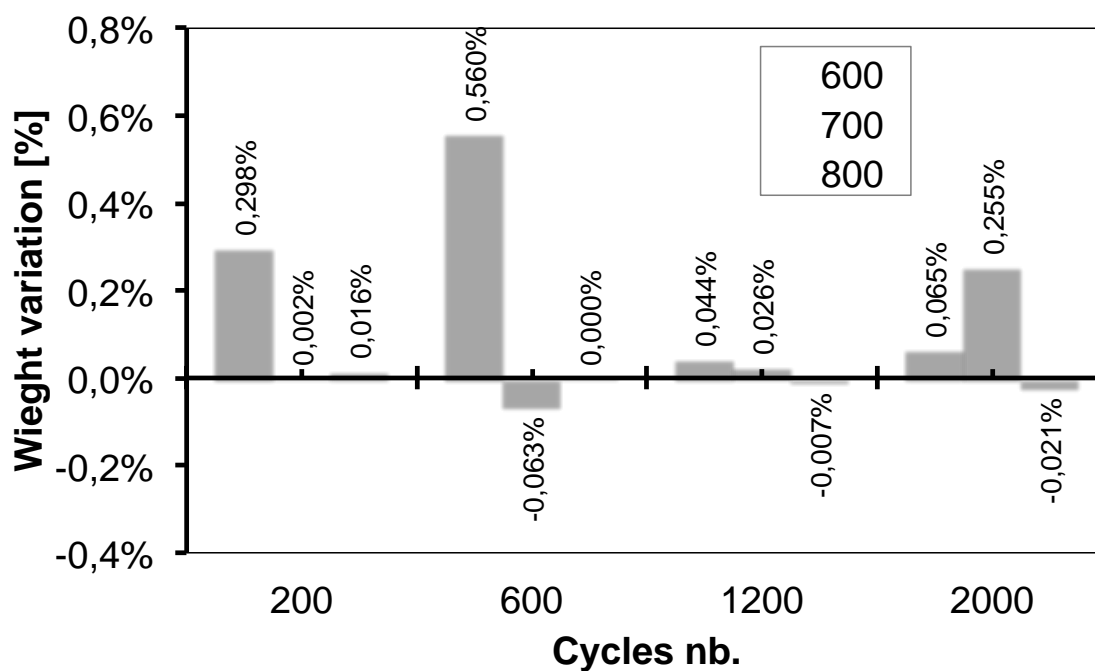
Nelle figure 39 e 40 è rappresentato la variazione di peso dei pin in AISI H11 durante i test.



Temperatura lamiera	200 cicli	600 cicli	1200 cicli	2000 cicli
600 °C	0,007%	-0,214%	-0,449%	-0,737%
700 °C	-0,007%	-0,114%	-0,426%	-0,808%
800 °C	-0,042%	-0,131%	-0,350%	-0,359%

Figura 39: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H11 vs Zn.

H11 vs AlSi



Temperatura lamiera	200 cicli	600 cicli	1200 cicli	2000 cicli
600 °C	0,298%	0,560%	0,044%	0,065%
700 °C	0,002%	-0,063%	0,026%	0,255%
800 °C	0,016%	0,000%	-0,007%	-0,021%

Figura 40: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H11 vs AlSi.

Le variazioni di peso dei campioni durante i processi, mettono in evidenza come i pin in acciaio AISI H11 testati contro lamiere con rivestimento a base di zinco tendano a subire usura principalmente di tipo abrasivo, mentre pin realizzati con lo stesso materiale testati contro lamiere rivestite in alluminio-silicio sono più soggetti ad usura adesiva.

Nelle immagini di figura 41, 42, 43 e 44 sono rappresentate le scansioni al profilometro ottico delle superfici del Pin H11 e un grafico riassuntivo della rugosità al variare dei cicli per meglio identificare l'usura avvenuta nei pin.

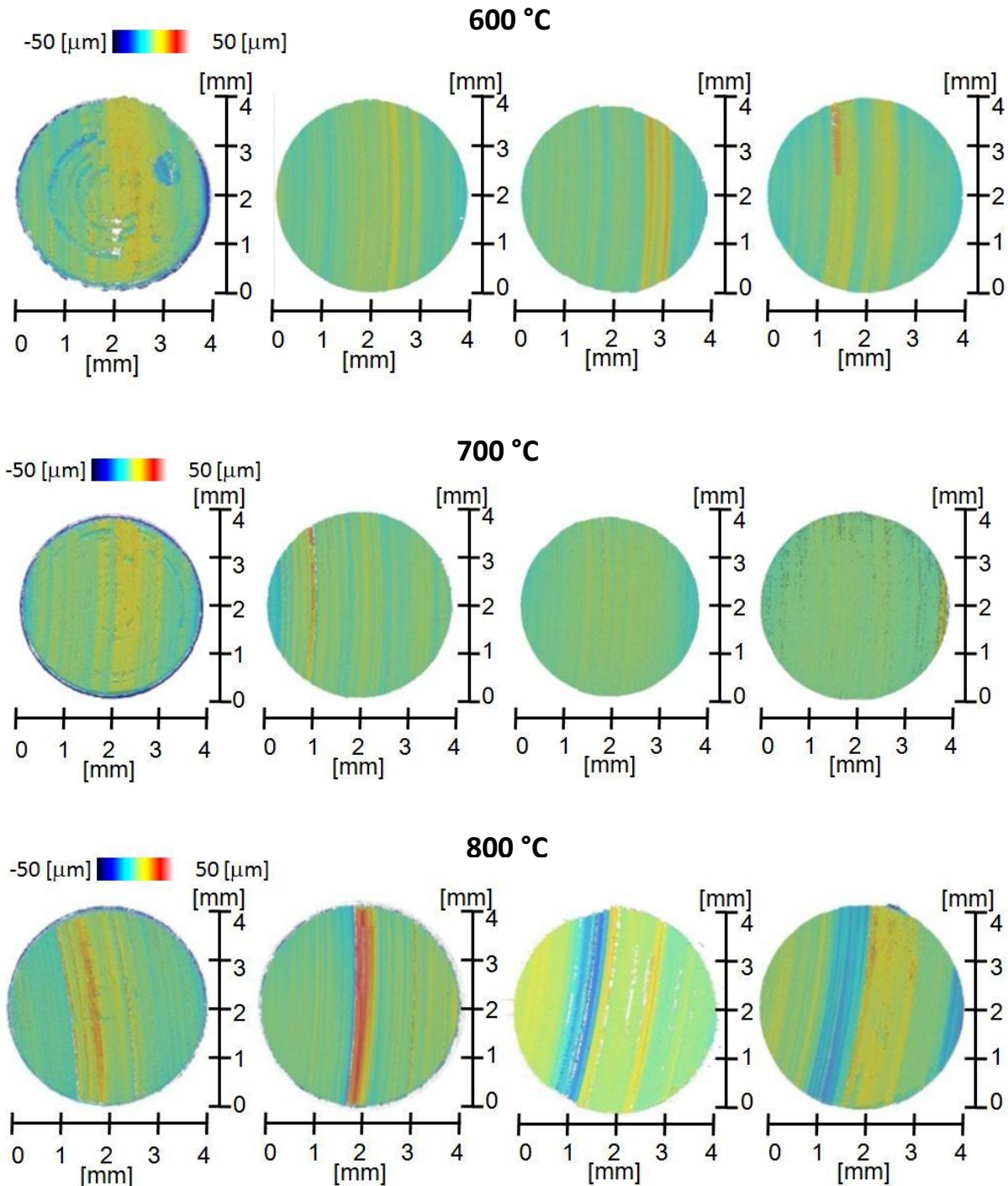


Figura 41: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso H11 vs Zn.

Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.

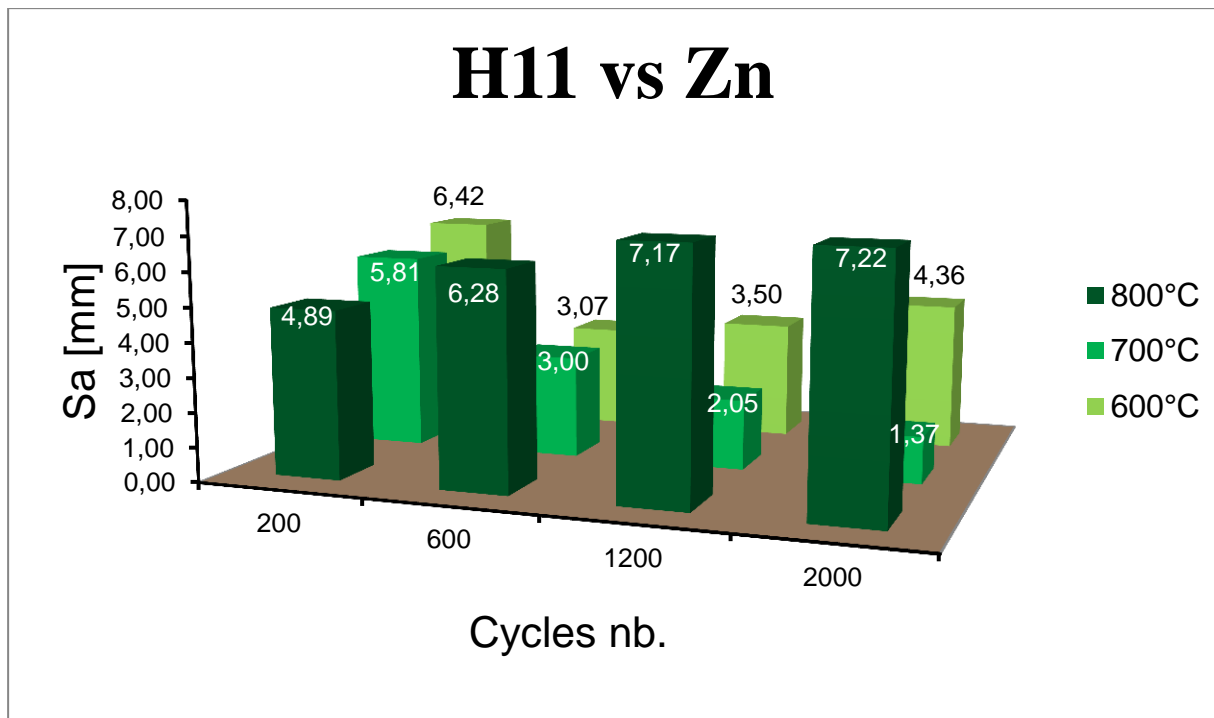
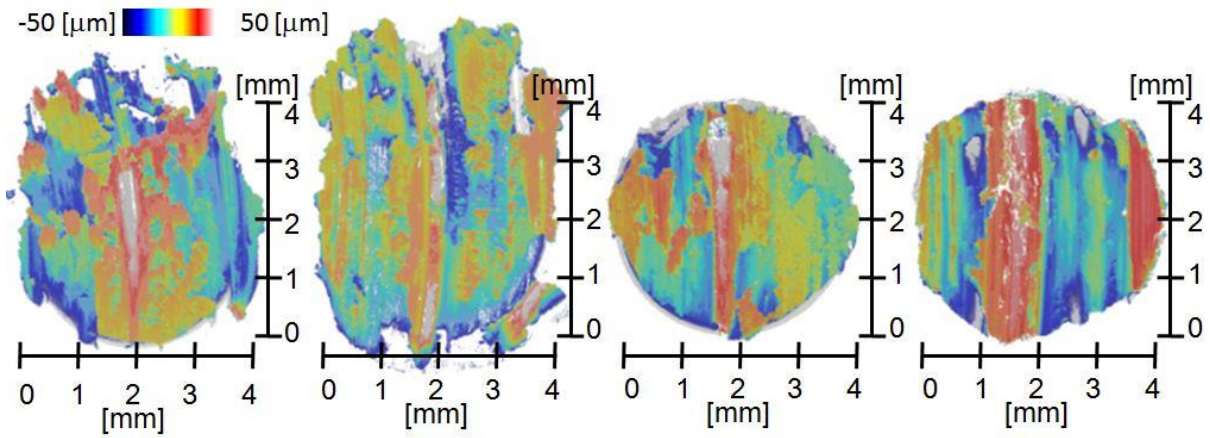


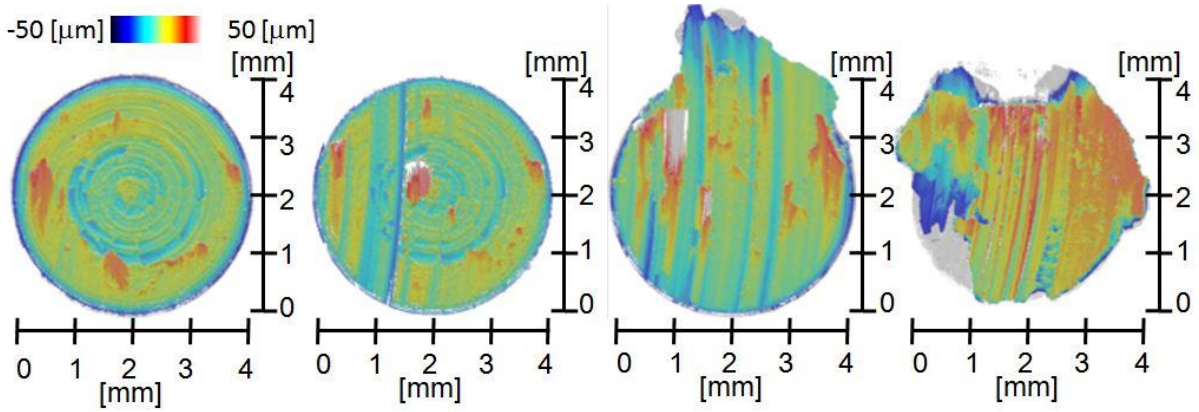
Figura 42: Andamento della rugosità nei test H11 vs Zn al variare della temperatura e del numero di cicli.

Le immagini di figura 41 e 42 evidenziano come il rivestimento a base di zinco a 600 °C e a 700 °C generi un'usura relativamente uniforme della superficie di contatto, confermando quanto riscontrato dall'analisi dei coefficienti d'attrito. L'appoggio non perfetto dei pin sulle lamiere causa un'usura non uniforme a 600 °C confermata dall'elevata rugosità riscontrata sul pin: a 200 cicli si possono ancora intravedere i segni di tornitura sulla metà sinistra della superficie. A 800 °C si osservano solchi ben definiti lungo la direzione del moto che causano, come osservato nel grafico, un aumento della rugosità superficiale: tali solchi sono imputabili a detriti con elevata durezza (probabilmente ossidi viste le alte temperature in gioco) presenti sulla lamiera.

600 °C



700 °C



800 °C

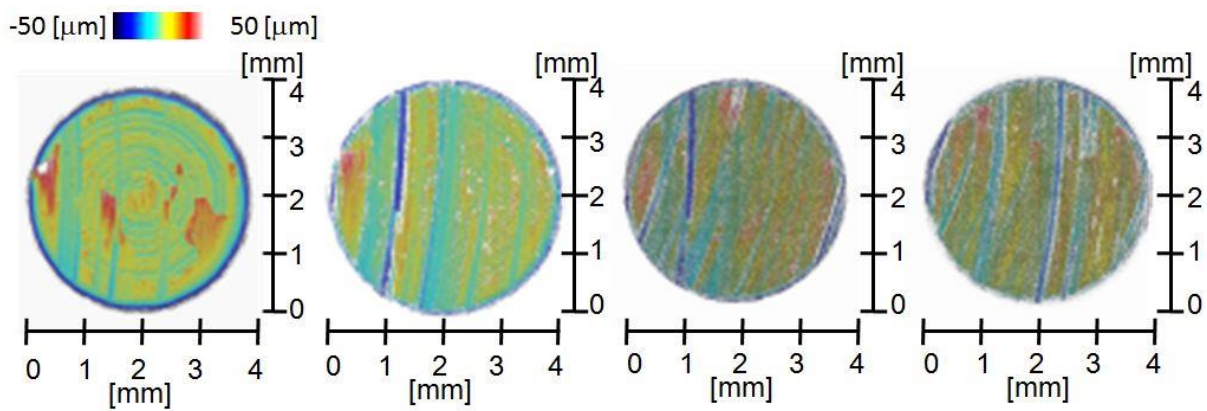


Figura 43: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso H11 vs AlSi.

Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.

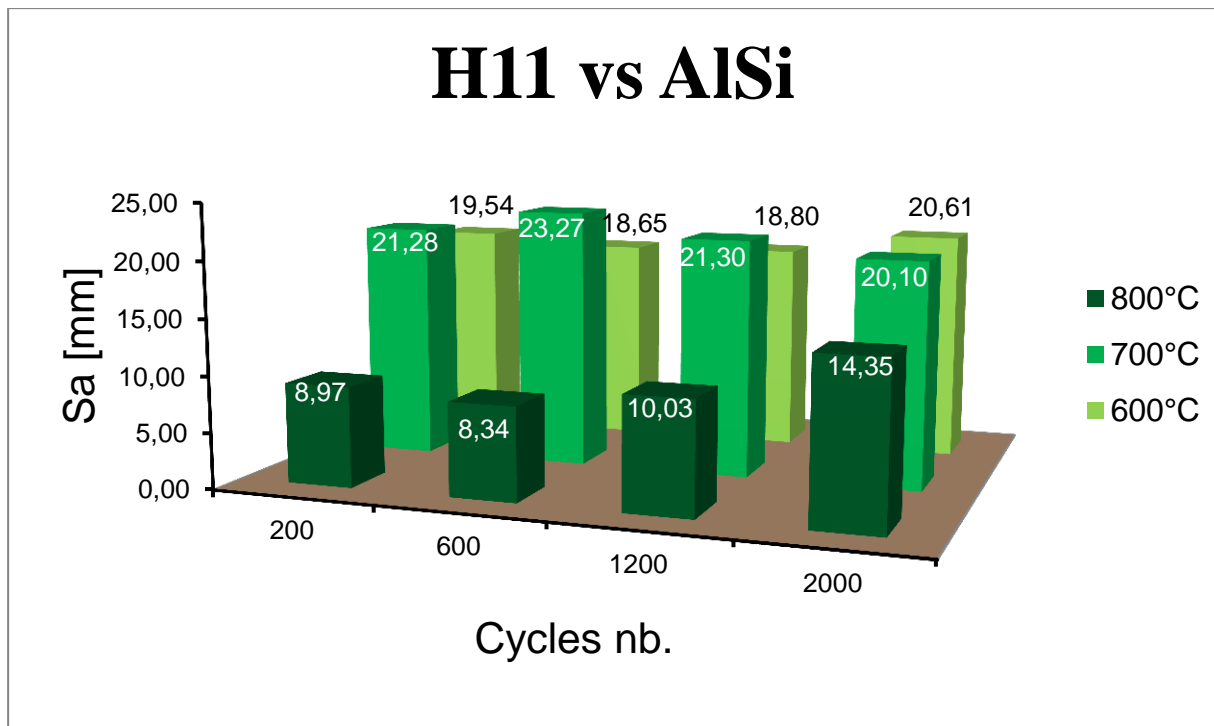
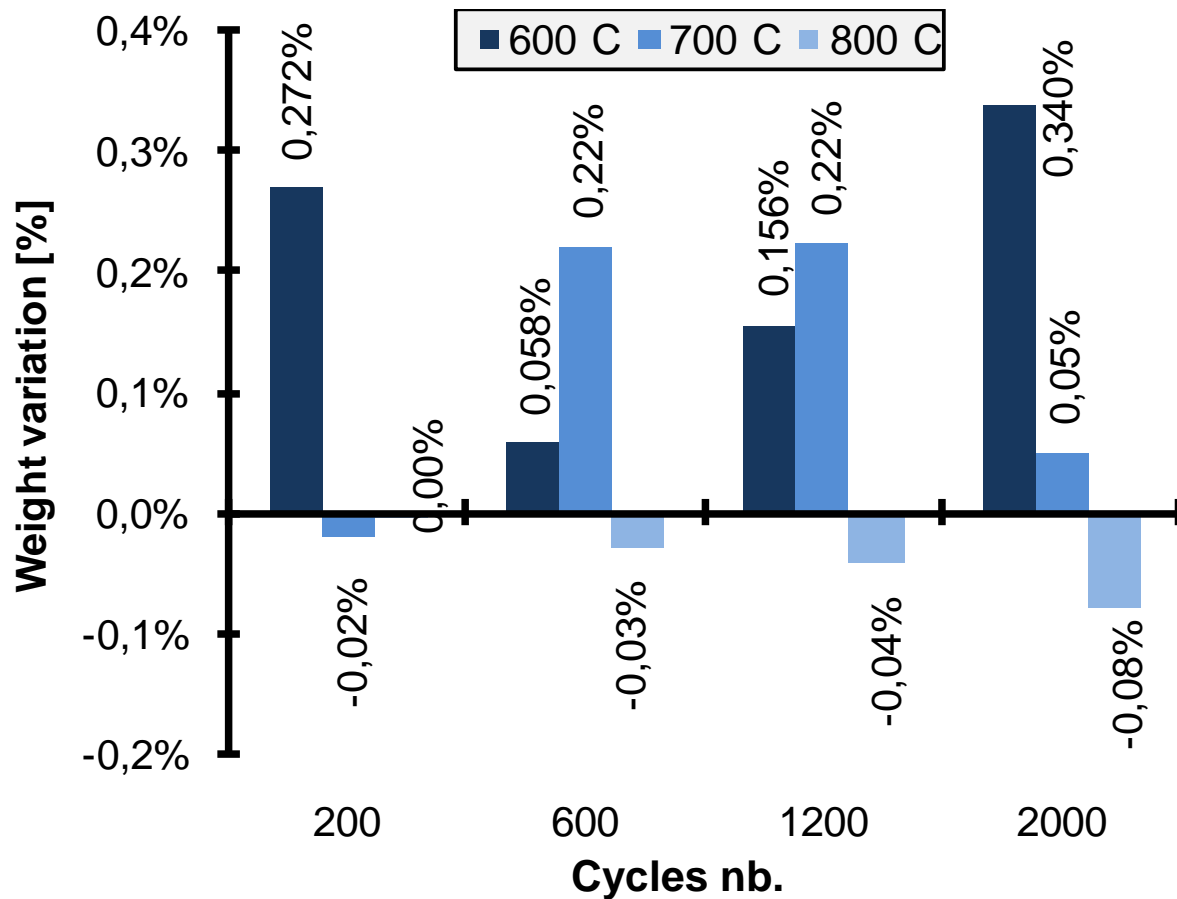


Figura 44: Andamento della rugosità nei test H11 vs AlSi al variare della temperatura e del numero di cicli.

Dall'osservazione delle immagini di figura 43 e 44 notiamo che il rivestimento di tipo alluminio-silicio causa al contrario dello zinco importanti adesioni sulla superficie del pin, in alcuni casi molto elevate tanto da modificare la geometria dell'area di contatto. Tale variazione, come notiamo sul grafico, comporta un elevato valore di rugosità nella superficie del pin. A 800°C si nota dal grafico una diminuzione della rugosità imputata come vediamo nelle immagini al profilometro alla minore adesione del rivestimento sulla superficie del pin. Anche in queste immagini è possibile notare casi di usura non uniforme dovuti ad un appoggio non perfetto del pin sul disco di lamiera e solchi a 800 °C imputabili alla formazione di ossidi sulla lamiera.

Per quanto riguarda invece gli acciai HTCS1® e HTCS3®, le immagini di figura 45 e 46 riassumono la variazione di peso dei campioni durante i test.

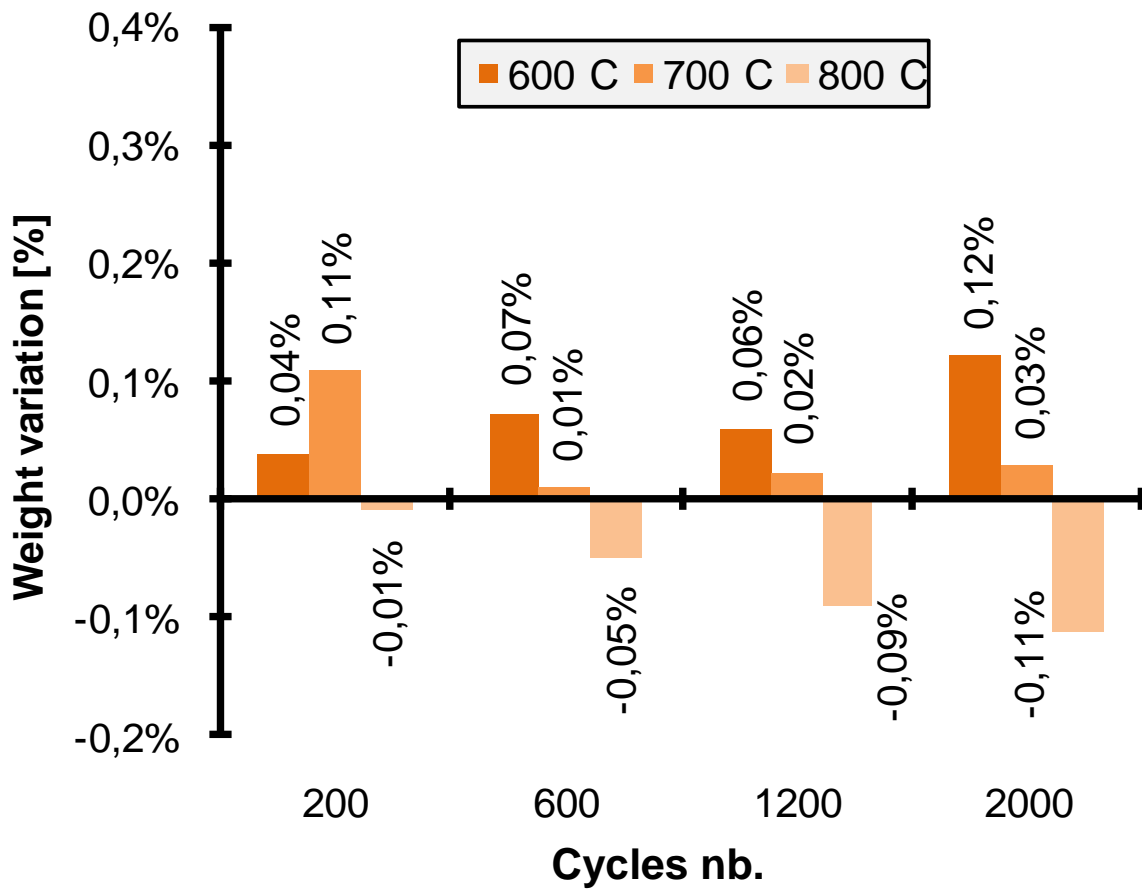
HTCS1 vs AISi



Temperatura lamiera	200 cicli	600 cicli	1200 cicli	2000 cicli
600 °C	0,27%	0,058%	0,156%	0,340%
700 °C	-0,020%	0,221%	0,223%	0,050%
800 °C	-0,003%	-0,028%	-0,043%	-0,079%

Figura 45: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H1TCS1® vs AISi.

HTCS3 vs AISi



Temperatura lamiera	200 cicli	600 cicli	1200 cicli	2000 cicli
600 °C	0,039%	0,074%	0,060%	0,121%
700 °C	0,111%	0,010%	0,024%	0,028%
800 °C	-0,009%	-0,049%	-0,090%	-0,113%

Figura 46: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H1TCS3® vs AISi.

Entrambi gli acciai HTCS1® e HTCS3® evidenziano un comportamento simile a quello dell'acciaio AISI H11, con usura principalmente di tipo adesiva a 600 °C e a 700 °C. viceversa, a 800 °C le variazioni sempre negative e di modulo crescente implicano che la componente dell'usura di tipo abrasivo sia preponderante.

Nelle figure di immagine 47, 48, 49 e 50 analogamente a prima sono rappresentate le scansioni al profilometro ottico delle superfici dei Pin HTCS1® e HTCS3® e un grafico riassuntivo della rugosità al variare dei cicli.

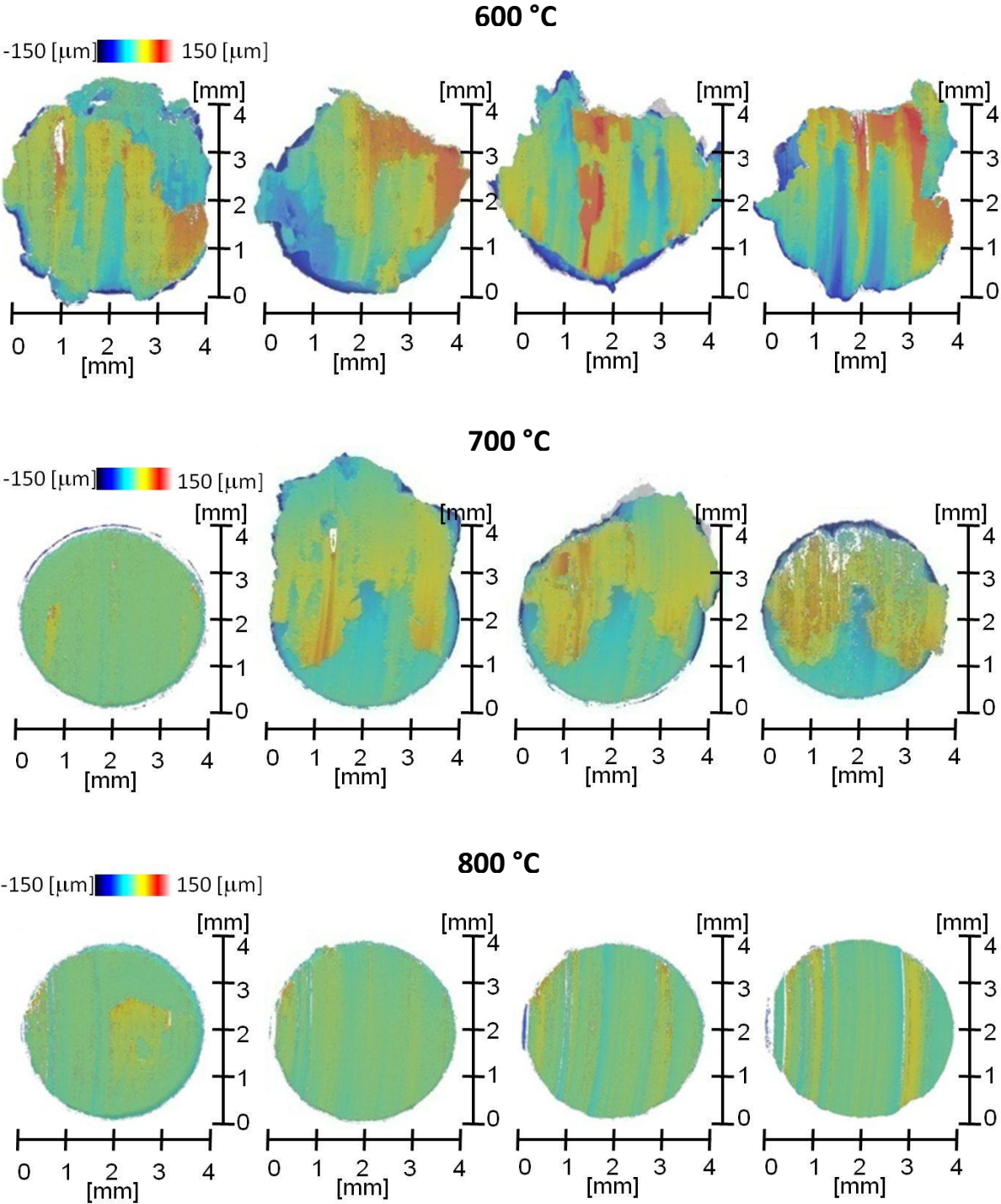


Figura 47: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso HTCS1® vs AlSi. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli .

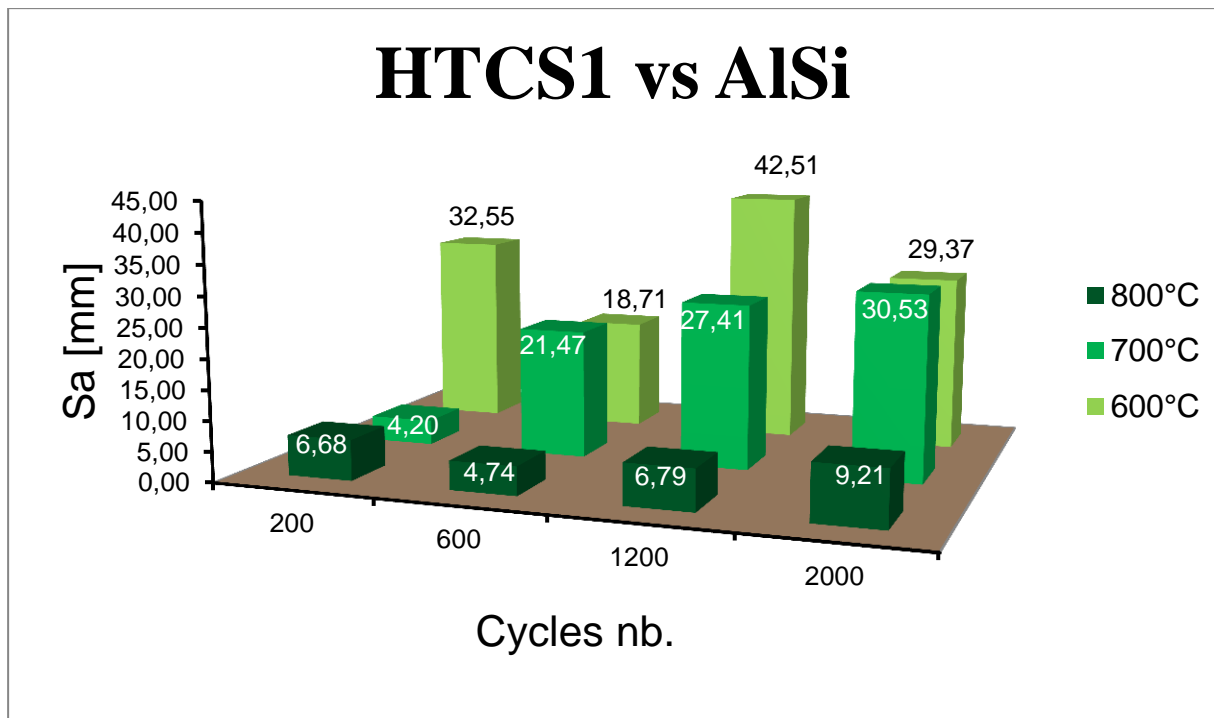


Figura 48: Andamento della rugosità nei test HTCS1® vs AISi al variare della temperatura e del numero di cicli.

Dalle immagini di figura 47 e 48 viene confermato il comportamento dell'acciaio HTCS1® simile a quello dell'acciaio H11 per quanto riguarda l'usura: a 600 °C e a 700 °C vi è la presenza di uno strato consistente di rivestimento delle lamiere che ha aderito al pin creando creste e in alcuni casi modificando la geometria della superficie di contatto. Tale variazione come notiamo sul grafico comporta un elevato valore della rugosità nella superficie del pin. Allo stesso modo del pin H11 a 800°C si ha una diminuzione della rugosità imputata come vediamo nelle immagini al profilometro alla minore adesione del rivestimento sulla superficie del pin.

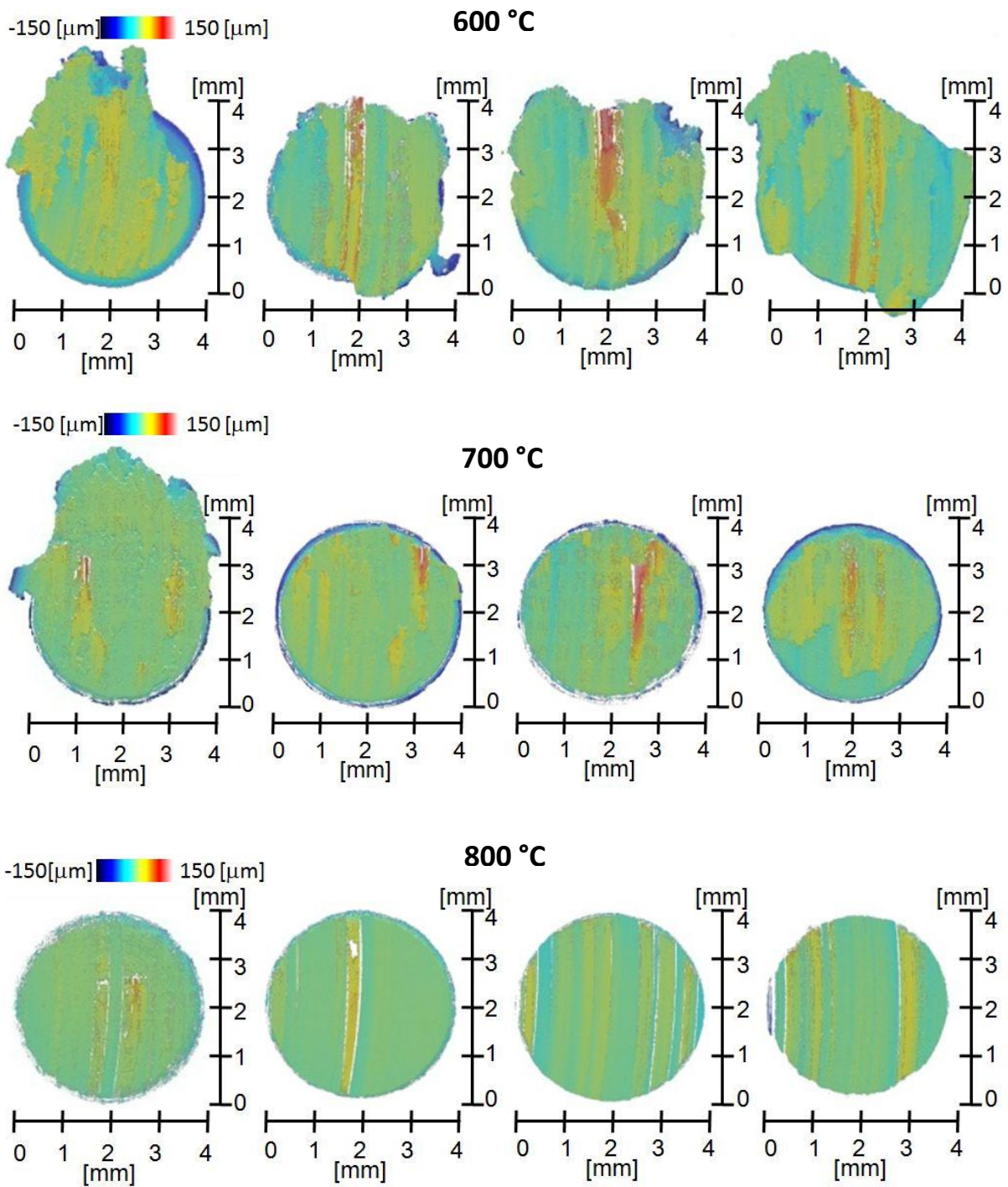


Figura 49: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso HTCS3® vs AlSi. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.

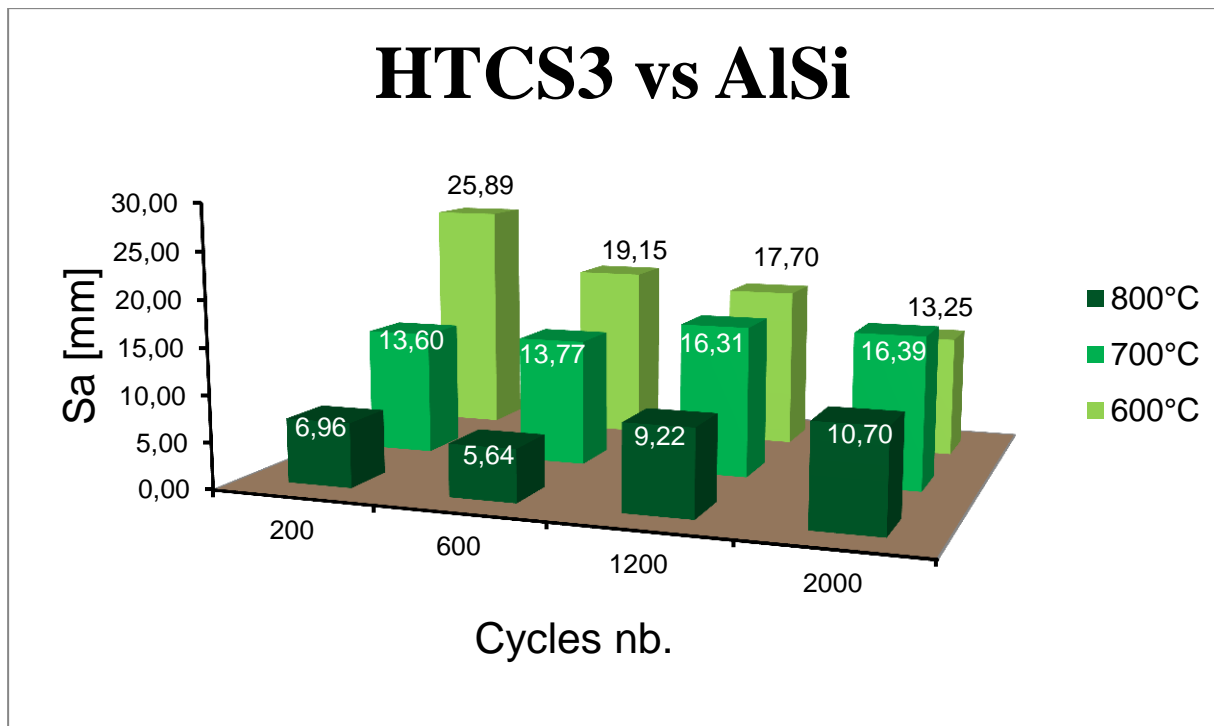


Figura 50: Andamento della rugosità nei test HTCS3® vs AISi al variare della temperatura e del numero di cicli.

Anche l'acciaio HTCS3® ha un comportamento simile all'HTCS1® come evidenziato nel grafico e nelle immagini di figura 49 e 50: la rugosità diminuisce all'aumentare della temperatura in quanto diminuisce l'adesione sulla superficie di contatto del pin. Una variante rispetto all'HTCS1® è la morfologia delle adesioni, che appaiono più uniformi.

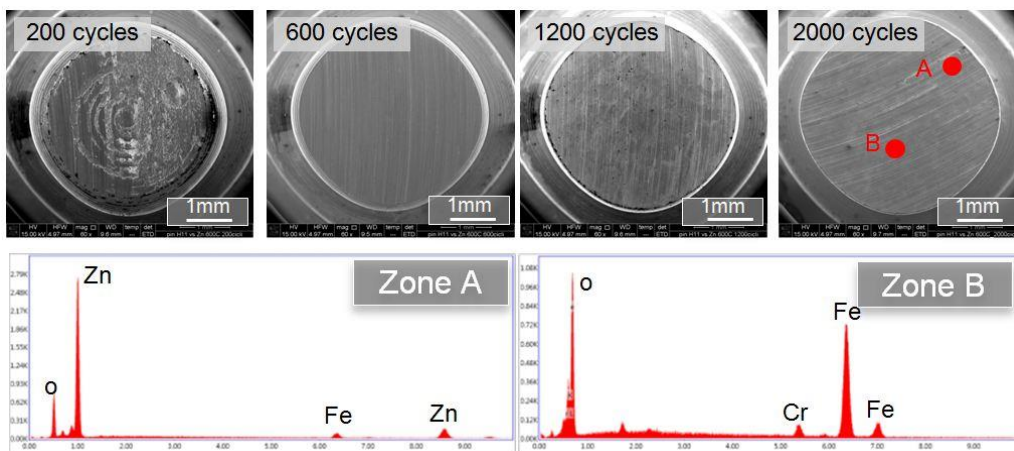
Come in tutti i test effettuati è comunque possibile osservare la presenza di graffi sulla superficie di contatto. Questi sono dovuti alla formazione all'interfaccia pin-lamiera di detriti, principalmente ossidi che vengono a generarsi a causa della lunga permanenza alle elevate temperature, che agiscono in combinazione all'usura di strisciamento.

4.5 Analisi microscopica della superficie dei pin e lamiera

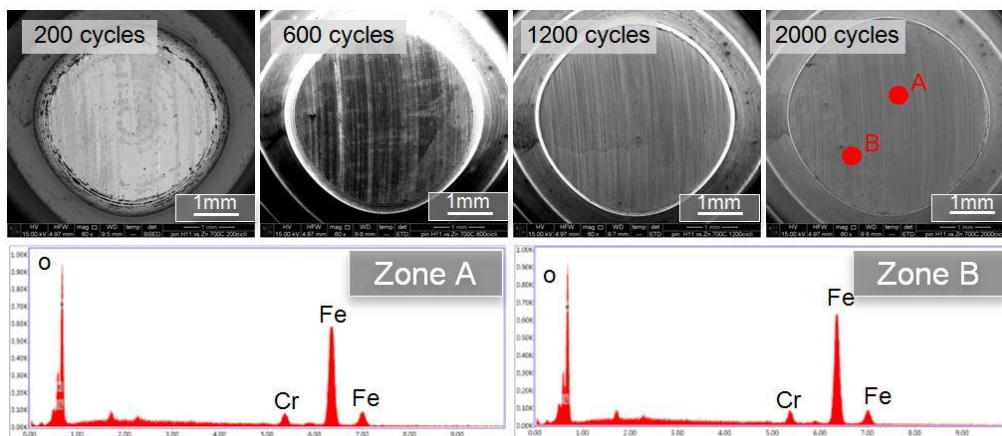
Tutti i pin H11, HTCS1® e HTCS3® durante le prove di pin on disk sono stati esaminati al microscopio elettronico a scansione (SEM) dopo 200, 600, 1200 e 2000 cicli.

Nelle figure 51, 52, 53 e 54 sono rappresentate le immagini al SEM e un'analisi EDS puntiforme della superficie dei pin dopo i 2000 cicli.

H11 - 600°C



H11 - 700 °C



H11 - 800 °C

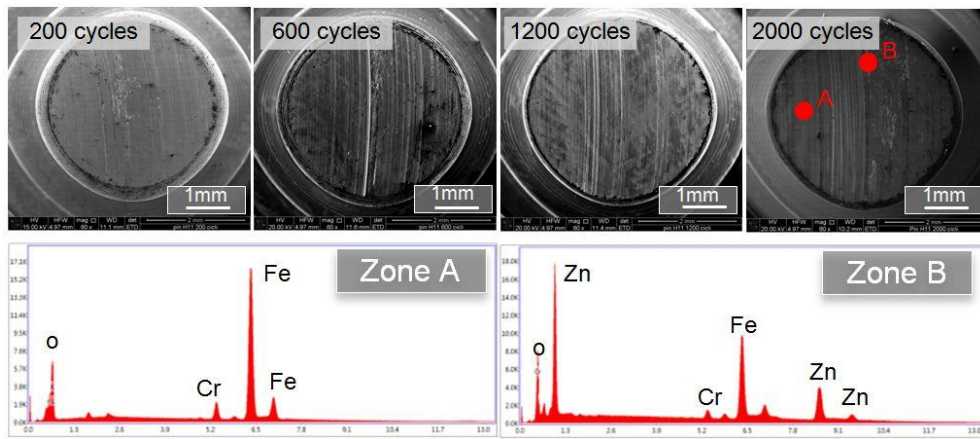
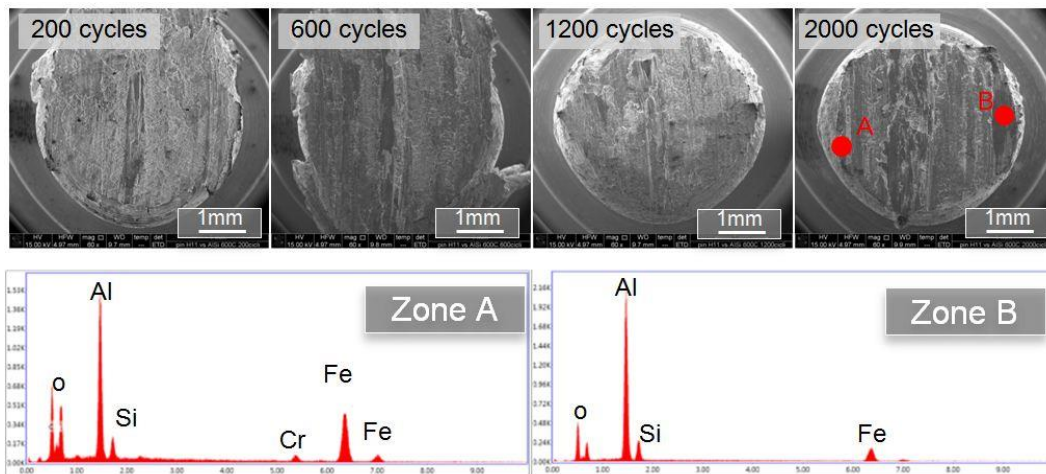
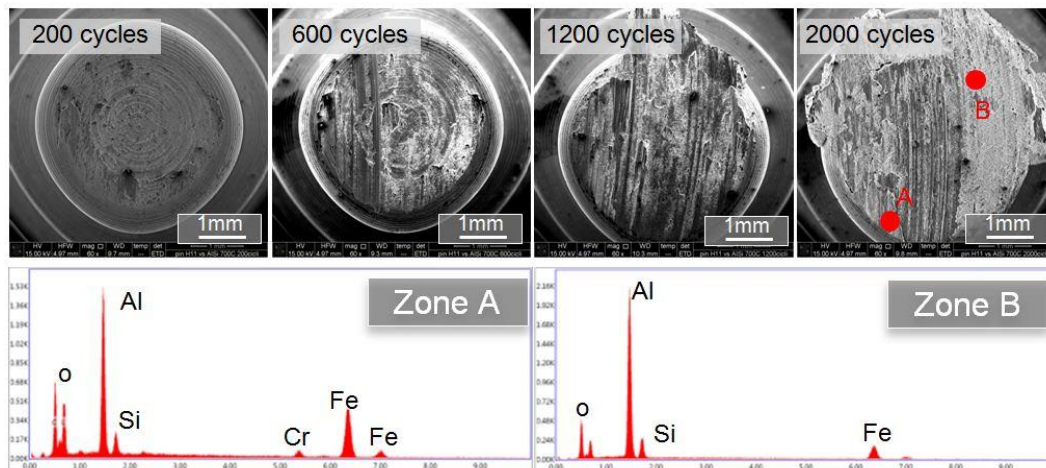


Figura 51: Immagini al SEM dei pin per il caso H11 vs Zn e analisi EDS dei punti evidenziati.

H11 - 600 °C



H11 - 700 °C



H11 - 800 °C

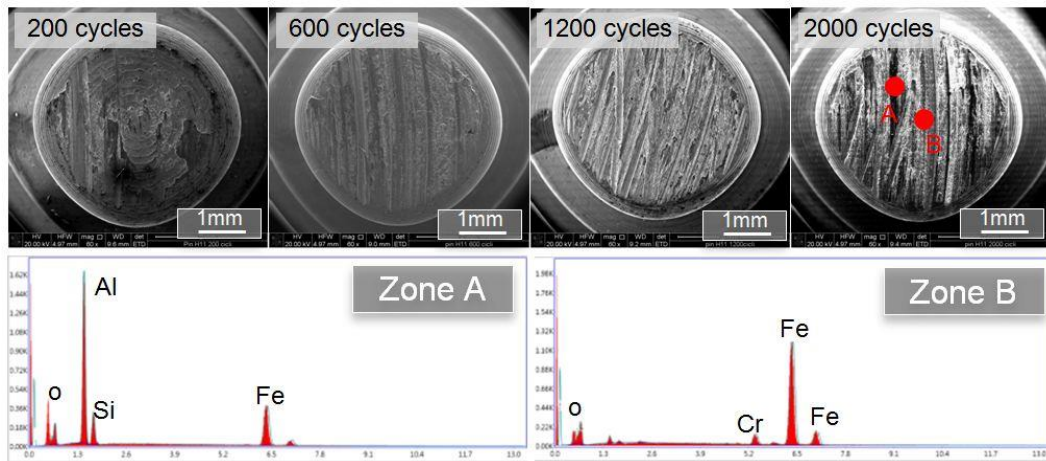
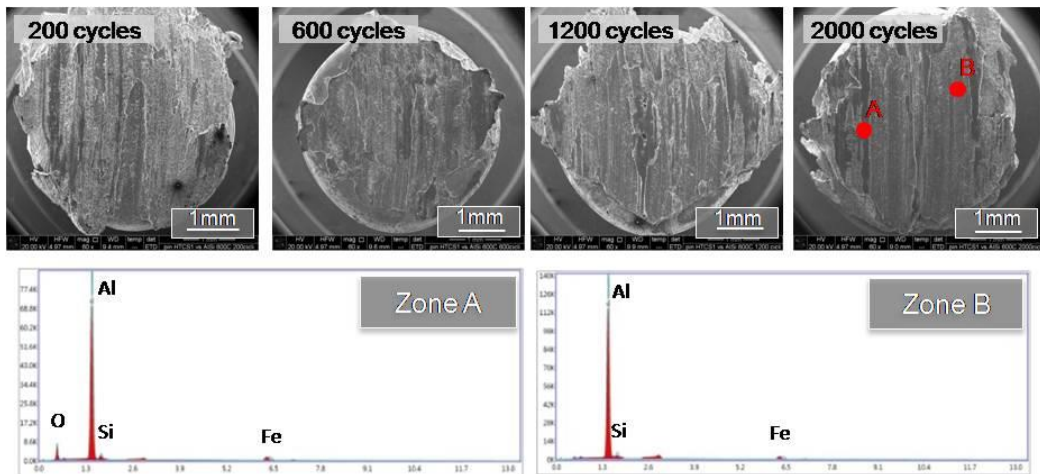
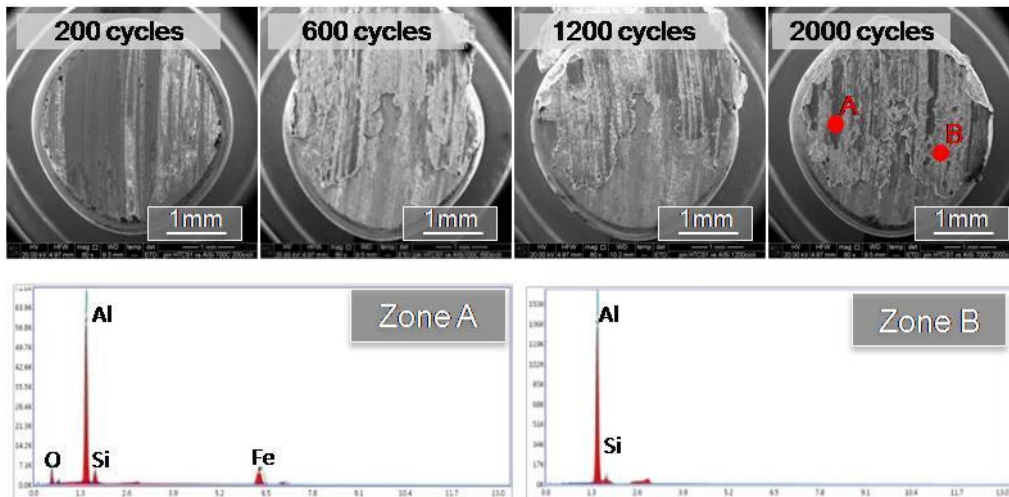


Figura 52: Immagini al SEM dei pin per il caso H11 vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.

HTCS1 - 600 °C



HTCS1 - 700 °C



HTCS1 - 800 °C

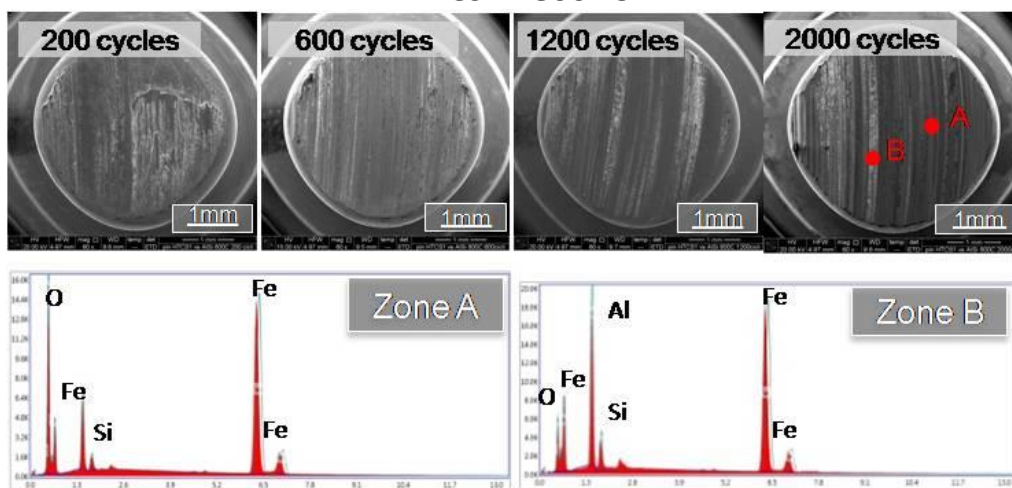
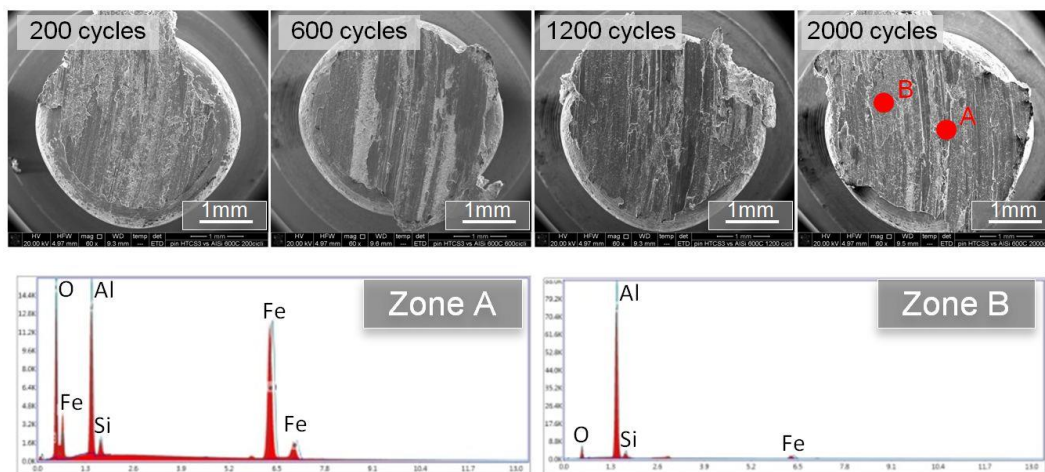
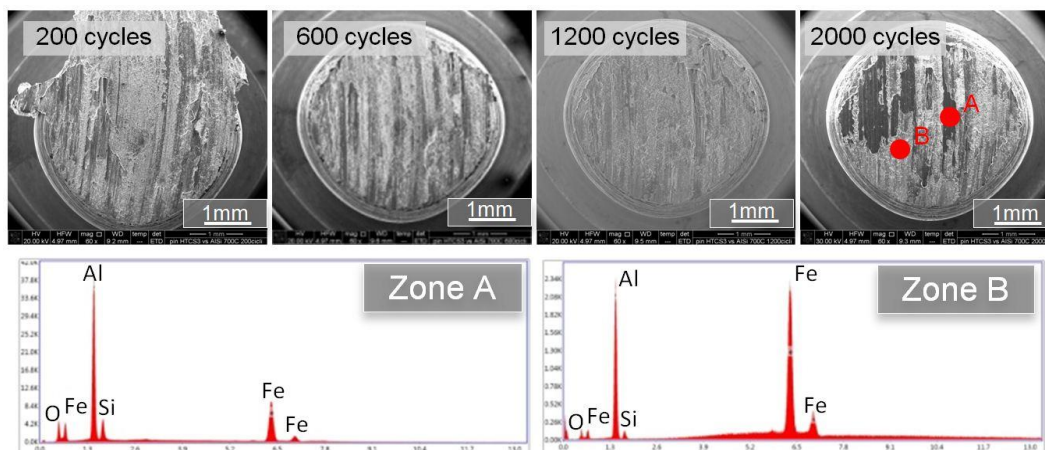


Figura 53: Immagini al SEM dei pin per il caso HTCS1® vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.

HTCS1 - 600 °C



HTCS3 - 700 °C



HTCS3 - 800 °C

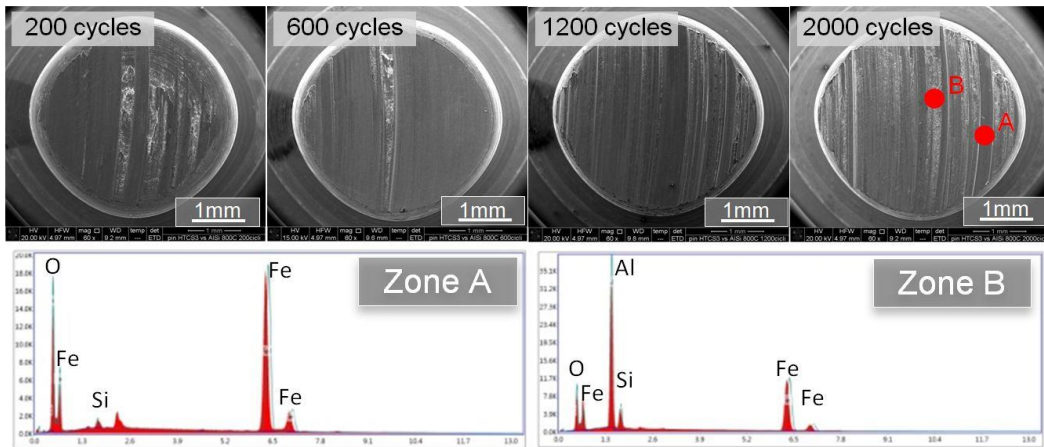


Figura 54: Immagini al SEM dei pin per il caso HTCS3® vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.

Allo stesso modo si sono condotte delle analisi sulle lamiera durante i test.

Nelle figure 55, 56 e 57 sono rappresentate le immagini al SEM e un'analisi EDS mapping della superficie della lamiera dopo 100 cicli, come definito nel piano sperimentale delle prove.

Zn e AlSi vs PIN H11

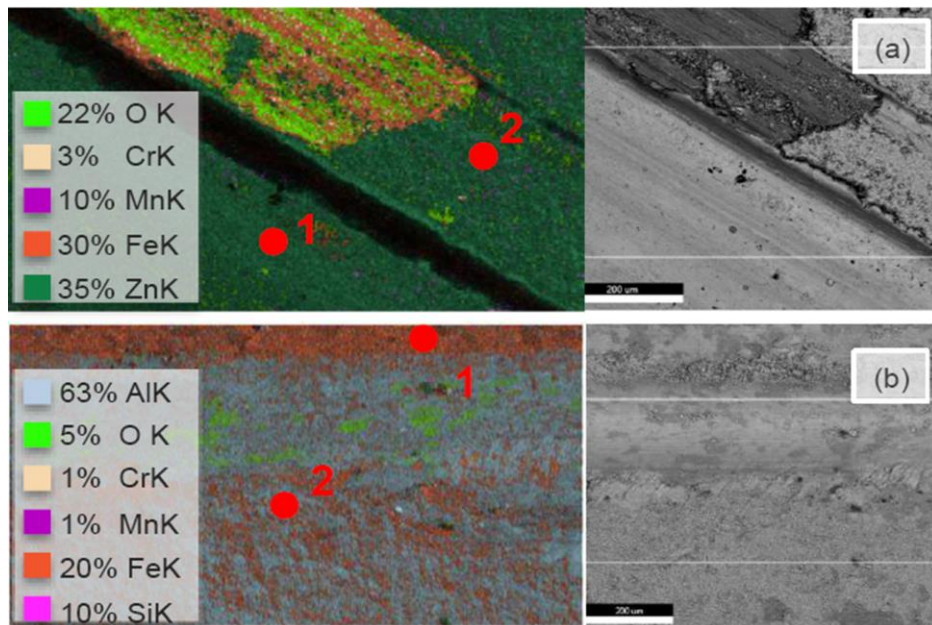
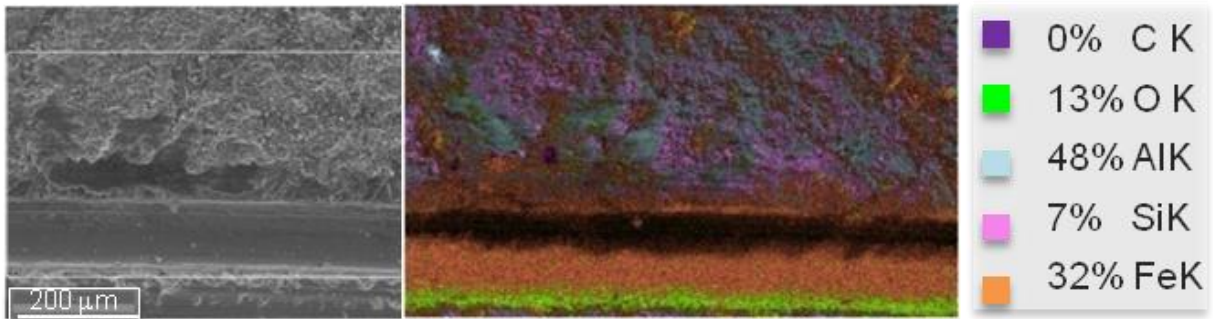


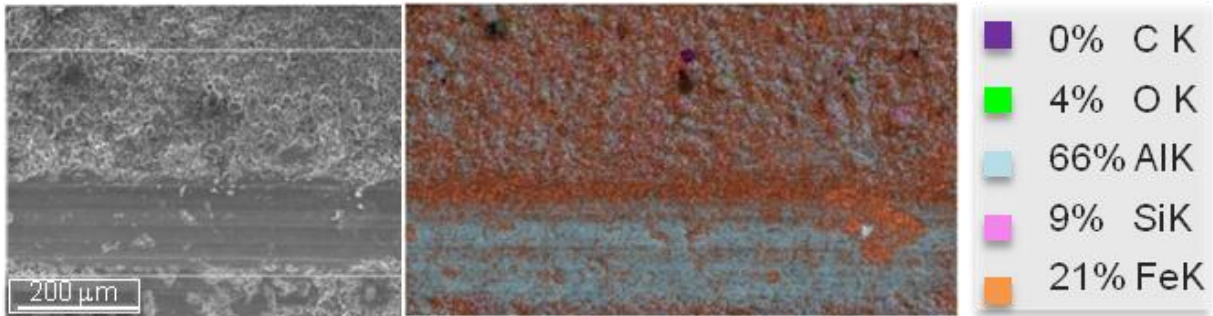
Figura 55: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con Zn (a) e lamiera rivestita con AlSi (b) nei test a 800°C.

AlSi vs PIN HTCS1

600° C



700° C



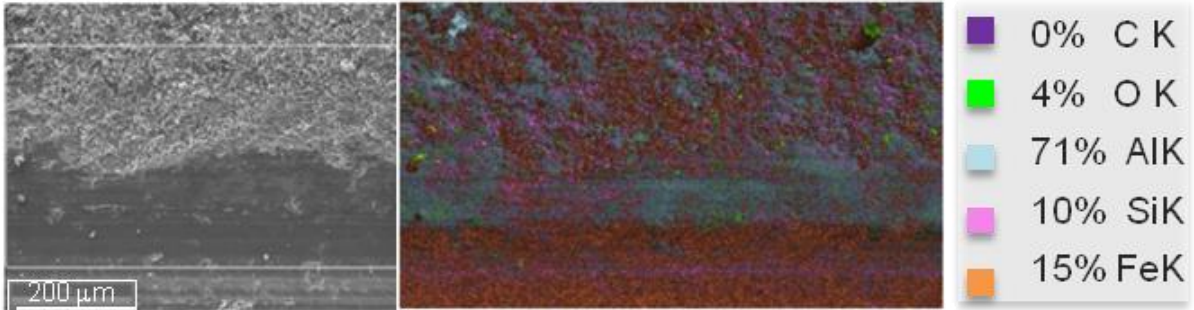
800° C



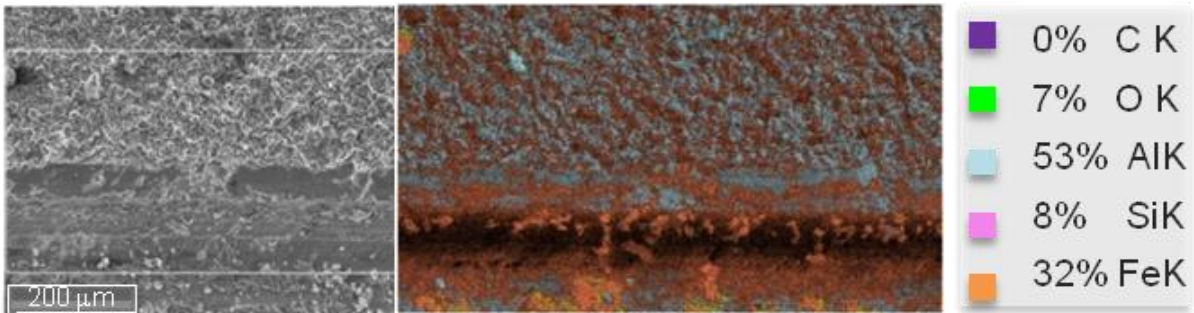
Figura 56: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con AlSi nei test con il pin in acciaio HTCS1®.

AlSi vs PIN HTCS3

600° C



700° C



800° C



Figura 57: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con AlSi nei test con il pin in acciaio HTCS3®.

Le immagini e le analisi al SEM sia dei pin che delle lamiere confermano quanto è stato dedotto dalle immagini ottenute con profilometro ottico e dai dati relativi alla variazione di peso causata dai meccanismi di usura adesiva e abrasiva. Inoltre le analisi EDS forniscono informazioni aggiuntive riguardo i tipi di usura:

- I pin testati contro lamiere con rivestimento a base di zinco presentano le superfici più uniformi. In alcuni punti è possibile trovare dello zinco sulla superficie dei pin, segno che il rivestimento delle lamiere ha in parte aderito ad essi.
- I pin in acciaio AISI H11 testati contro lamiere con rivestimento alluminio-silicio presentano superfici molto irregolari dovute all'elevata quantità di rivestimento che aderisce alla superficie alle temperature di 600 °C e 700 °C. Tuttavia a 800 °C si possono trovare solchi in cui sono praticamente assenti alluminio e silicio, quindi l'usura abrasiva assume maggiore rilevanza e arriva a scalfire l'acciaio del pin.
- I pin in acciaio HTCS1® e HTCS3®, similmente a quelli in AISI H11, presentano importanti adesioni a 600 °C e a 700 °C, ma le superfici appaiono comunque più uniformi. A 800 °C, nonostante il peso sia in continua diminuzione per tutto il processo e quindi l'usura sia principalmente abrasiva, è comunque presente del rivestimento delle lamiere che ha aderito alle superfici dei pin.

Capitolo 5

CONCLUSIONI

Il comportamento tribologico dei rivestimenti AlSi e Zn applicati all'acciaio alto resistenziale 22MnB5 sono stati analizzati attraverso prove di pin on disk test, le quali riproducono in laboratorio le condizioni all'interfaccia tra stampo e lamiera, replicando sollecitazioni termiche e meccaniche che insorgono ciclicamente durante il processo.

I test sull'attrito mostrano come il rivestimento a base di Zn si comporti generalmente meglio rispetto a quello con AlSi, anche se tali differenze in termini di coefficiente d'attrito sono minime.

Le prove di pin on disk alle temperature di 600°C, 700°C e 800°C con pin in acciaio AISI H11 hanno dimostrato che per il rivestimento Zn più bassa è la temperatura di prova più basso risulterà il coefficiente d'attrito: a 600°C il valore trovato è di 0,47 e a 800°C di 0,50. Mentre per il rivestimento di AlSi vi è una diminuzione del coefficiente d'attrito all'aumentare della temperatura: a 600°C il valore trovato è di 0,59 e a 800°C di 0,50.

Alla temperatura di 800°C il valore del coefficienti d'attrito per i due rivestimenti è approssimativamente lo stesso, lievemente inferiore nel caso dello zinco.

Alla temperature di prova di 700°C e 800°C si notano valori di coefficiente d'attrito più bassi rispetto alle basse temperature in entrambi i rivestimenti. Tale comportamento può essere imputabile all'instaurarsi di un meccanismo di lubrificazione tra le due superfici, stampo e lamiera, a causa della diminuzione di resistenza del rivestimento che tende ad aderire ad entrambe le superfici creando uno strato che funge quindi da lubrificante durante il loro movimento relativo.

Alla temperatura di 600°C il rivestimento AlSi mostra un leggero aumento del coefficiente d'attrito, probabilmente causato dalla maggior resistenza a taglio del rivestimento al diminuire della temperatura. Diversamente lo Zn presenta un coefficiente d'attrito relativamente costante al diminuire della temperatura, questo può essere spiegato considerando che la rugosità del rivestimento è quasi costante alle varie temperature di prova.

Più evidenti sono le differenze sul comportamento ad usura dei due rivestimenti al variare dei parametri delle prove di pin on disk. Si nota che la tipologia di rivestimento incide fortemente

sulla temperatura del pin, nonché dello stampo, con un maggior trasferimento di calore nel caso dello Zn.

Per entrambi i rivestimenti, l'usura degli stampi appare una combinazione tra fenomeni di abrasione e fenomeni di adesione: l'abrasione è più rilevante nel caso del pin contro la lamiera rivestita di Zn, mentre l'adesione si osserva maggiormente nel caso del pin contro la lamiera rivestita di AlSi.

L'usura abrasiva è predominante nel caso del pin contro lo Zn in quanto si può notare una graduale diminuzione del suo peso in tutte le condizioni di temperatura. Al contrario il pin contro il rivestimento di AlSi presenta una quasi assente abrasione rilevata. Questo comportamento può essere correlato ai diversi coefficienti di scambio termico dei due rivestimenti, che comportano una maggiore temperatura di lavoro nel caso dello Zn con una diminuzione della durezza del materiale del pin sopra i 200°C.

L'usura adesiva invece è preponderante nel caso del pin contro il rivestimento AlSi, in particolare alle basse temperature, 600°C e 700°C, vi è un'importante adesione del rivestimento sulla superficie del pin. Tale comportamento potrebbe essere causato dai fenomeni diffusivi del Fe e Al, i quali sono molto influenzati dalle temperature di prova.

A 800°C in generale il comportamento del rivestimento Zn è del tutto paragonabile a quello AlSi, ma quando si abbassa la temperatura di prova le prestazioni del rivestimento Zn diminuiscono drasticamente in termini di resistenza all'usura.

Oltre al confronto dei due rivestimenti AlSi e Zn con il classico acciaio AISI H11, nel lavoro esposto si sono effettuate prove di pin on disk test con acciai innovativi, HTCS1® e HTCS3®, contro lamiere di acciaio alto resistenziale rivestite da AlSi.

I test sull'attrito al variare delle temperature di prova hanno dimostrato una diminuzione del coefficiente d'attrito di entrambi gli acciai all'aumentare della temperatura con valori per l'acciaio HTCS1® di 0,58 a 600°C e di 0,47 a 800°C, e valori per l'acciaio HTCS3® di 0,59 e 0,49 alle medesime temperature. Rispetto all'acciaio H11 presentano minori coefficienti d'attrito e una conseguente minor resistenza allo scorrimento.

Di notevole interesse è il comportamento termico dei due acciai. Alla temperatura di 800°C l'acciaio HTCS3® permette una migliore dissipazione del calore durante la fase di raffreddamento, mentre l'acciaio HTCS1® permette una dissipazione superiore alle basse temperature di 600°C e 700°C. Tale comportamento può essere attribuito al non costante andamento della conducibilità termica degli acciai alle varie temperature.

Entrambi gli acciai HTCS1® e HTCS3® operano a temperature medie di lavoro inferiori rispetto all'acciaio H11.

Non di minor importanza sono i fenomeni di usura riscontrati in tali acciai. Il comportamento sia dell'acciaio HTCS1® e sia dell'acciaio HTCS3® è molto simile a quello riscontrato nei test con il pin H11 in quanto alle basse temperature di prova, 600°C e 700°C, vi è la presenza di una forte adesione del rivestimento AlSi sui pin, favorendo il meccanismo di usura adesiva. L'acciaio HTCS3® risulta però meno interessato da fenomeni di adesione rispetto l'HTCS1® alla temperatura di 600°C, con un aumento percentuale di peso dello 0,12% rispetto al 0,34%. A 800°C invece, come nel pin H11, vi è una diminuzione drastica della rugosità dei pin imputata alla mancata presenza di adesione sulla superficie di contatto, favorendo in tale caso l'usura abrasiva. In entrambi gli acciai HTCS1® e HTCS3® vi è un'usura abrasiva maggiore rispetto l'acciaio standard H11, tale fenomeno può ridurre sensibilmente la vita di servizio degli stampi.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Schematizzazione del moto tra due corpi a contatto con definizione di coefficiente di attrito statico e cinematico.....	9
Figura 2: Rappresentazione schematica dell'interfaccia tra due superfici di contatto.....	10
Figura 3: Schematizzazione del meccanismo di usura adesiva.....	12
Figura 4: Schematizzazione del meccanismo di usura abrasiva.....	12
Figura 5: Sequenza delle operazioni di stampaggio a caldo diretto e indiretto.....	14
Figura 6: Principali parti stampate a caldo.....	15
Figura 7: Trasformazioni microstrutturali dell'acciaio 22MnB5.....	16
Figura 8: Fasi dello stampaggio a caldo diretto di una lamiera in 22MnB5.....	17
Figura 9: Usuale ciclo termico a cui sono sottoposte le lamiere in acciaio 22MnB5 nel processo di stampaggio a caldo.....	19
Figura 10: Schematizzazione del processo di stampaggio a caldo diretto.....	20
Figura 11: Schematizzazione del processo di contemporanee formatura e tempra delle lamiere nello stampaggio a caldo.....	20
Figura 12: Evoluzione della resistenza a trazione in funzione della temperatura per l'acciaio 22 MnB5.....	21
Figura 13: B-pillar con proprietà meccaniche differenziate.....	22
Figura 14: Immagine di un microtribometro e relativo PC.....	26
Figura 15: Lamiera montata sul cilindro rotante all'interno del forno di riscaldamento.....	27
Figura 16: Schematizzazione del pin on disk test e della formula utilizzata per il calcolo del coefficiente d'attrito.....	27
Figura 17: a) Microtribometro utilizzato b) Movimentazioni del pin c) Schema del pin in contatto con la lamiera che ruota ad elevate temperature.....	28
Figura 18: Lamiera montata sul cilindro rotante all'interno del forno di riscaldamento regolato a 800°C.....	29
Figura 19: Dischi in 22mnB5 rivestiti utilizzati nel pin on disk test.....	30
Figura 20: Schema della geometria del pin cilindrico.....	31
Figura 21: a) Foro per inserire termocoppia b) pin cilindrico rapportati ad una moneta.....	31
Figura 22: a) sistema di bloccaggio del pin con termocoppia e cella di carico b) pin alloggiato sopra la termocoppia.....	33

Figura 23: Schema della movimentazione del pin dalla posizione iniziale in prossimità dell'ugello al contatto e viceversa.....	33
Figura 24: Microscopio elettronico a scansione SEM presente nel laboratorio Te.Si. di Rovigo.....	34
Figura 25: Foto SEM, immagine Profilometro Ottico, Analisi EDS puntiforme strato di AlSi su 22MnB5.....	38
Figura 26: Foto SEM, immagine Profilometro Ottico, Analisi EDS puntiforme strato di Zn su 22MnB5.....	39
Figura 27: Diffusione del Fe in termini di weight% nel rivestimento AlSi al variare della temperatura e tempo di mantenimento.....	40
Figura 28: Diffusione del Fe in termini di weight% nel rivestimento Zn al variare della temperatura e tempo di mantenimento.....	41
Figura 29: Immagini al SEM e andamento rugosità del rivestimento AlSi all'aumentare della temperatura.....	42
Figura 30: Immagini al SEM e andamento rugosità del rivestimento Zn all'aumentare della temperatura.....	43
Figura 31: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova H11 vs Zn.....	44
Figura 32: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova H11 vs AlSi.....	45
Figura 33: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova HTCS3® vs AlSi.....	46
Figura 34: Andamento del coefficiente d'attrito in funzione del numero di cicli per la configurazione di prova HTCS1® vs AlSi.....	47
Figura 35: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione H11 vs Zn.....	48
Figura 36: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione H11 vs AlSi.....	49
Figura 37: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione HTCS1® vs AlSi.....	50
Figura 38: Andamento della temperatura dei pin con relativi valori di Temperatura media e ΔT a regime per la configurazione HTCS3® vs AlSi.....	51

Figura 39: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H11 vs Zn.....	52
Figura 40: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso H11 vs AlSi.....	53
Figura 41: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso H11 vs Zn. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.....	54
Figura 42: Andamento della rugosità nei test H11 vs Zn al variare della temperatura e del numero di cicli.....	55
Figura 43: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso H11 vs AlSi. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.....	56
Figura 44: Andamento della rugosità nei test H11 vs AlSi al variare della temperatura e del numero di cicli.....	57
Figura 45: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso HTCS1® vs AlSi.....	58
Figura 46: Variazione percentuale del peso dei pin per il caso HTCS3® vs AlSi.....	59
Figura 47: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso HTCS1® vs AlSi. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli	60
Figura 48: Andamento della rugosità nei test HTCS1® vs AlSi al variare della temperatura e del numero di cicli.....	61
Figura 49: Scansioni al profilometro ottico delle superfici dei pin per il caso HTCS3® vs AlSi. Da sinistra a destra, scansioni relative a 200, 600, 1200 e 2000 cicli.....	62
Figura 50: Andamento della rugosità nei test HTCS3® vs AlSi al variare della temperatura e del numero di cicli.....	63
Figura 51: Immagini al SEM dei pin per il caso H11 vs Zn e analisi EDS dei punti Evidenziati.....	65
Figura 52: Immagini al SEM dei pin per il caso H11 vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.....	66
Figura 53: Immagini al SEM dei pin per il caso HTCS1® vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.....	67
Figura 54: Immagini al SEM dei pin per il caso HTCS3® vs AlSi e analisi EDS dei punti evidenziati.....	68
Figura 55: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con Zn (a) e lamiera rivestita con AlSi (b) nei test a 800°C.....	68
Figura 56: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con AlSi nei test con il pin in acciaio HTCS1®.....	69
Figura 57: Immagini al SEM e analisi EDS mapping lamiera rivestita con AlSi nei test con il pin in acciaio HTCS3®.....	70

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Componenti chimici degli acciaio al boro.....	16
Tabella 2: Specifiche tecniche dell'apparato strumentale.....	28
Tabella 3: Composizione chimica dell'acciaio dei pin e dello substrato delle lamine utilizzate.....	30
Tabella 4: Rugosità media dei pin ricavate tramite software dalle scansioni al profilometro.....	35
Tabella 5: Parametri di Riscaldamento, Mantenimento, Raffreddamento del piano sperimentale delle prove.....	40
Tabella 6: Valore medio del coefficiente d'attrito nelle varie configurazioni di prova.....	47
Tabella 7: Temperatura media e ΔT a regime per i casi H11 vs AlSi, HTCS1® vs AlSi e HTCS3® vs AlSi.....	51

ACRONIMI

SEM	Scanning Electron Microscope
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
AISI	American Iron and Steel Institute
CETR	Center for Tribology
HSS	High Strength Steel
Al	Alluminio
Si	Silicio
Zn	Zinco
Mn	Manganese
B	Boro
Cr	Cromo
Mo	Molibdeno
Fe	Ferro
HRC	Hardness Rockwell Cone
Wt	Weight
COF	Coefficient Of Friction

Bibliografia

- [1] " Evaluating the effectiveness of a new Zn-based coating in direct hot stamping of HSS"
A. Ghiotti, P. F. Bariani, S. Bruschi, F. Sgarabotto, J. Puerta Velasquez
- [2] " Wear behaviour of Al-Si and Zn coated 22MnB5 in hot stamping"
P. F. Bariani, S. Bruschi, A. Ghiotti, F. Medea
- [3] "A novel approach to wear testing in hot stamping of high strength boron steel sheets"
F. Sgarabotto, A. Ghiotti, S. Bruschi
- [4] "Analisi del comportamento tribologico di materiali per stampi in operazioni di stampaggio a caldo di lamiere in 22MnB5"
F. Medea
- [5] "Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions"
A. Ghiotti, S. Bruschi, F. Borsetto, *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 1694– 1700
- [6] "Friction and wear behaviour of high boron steel at elevated temperatures of up to 800 °C"
J. Hardell, E. Kassfeldt, B. Prakash, *Wear* 264 (2008) 788–799
- [7] "High-temperature friction and wear behaviour of different tool steels during sliding against Al–Si-coated high strength steel"
J. Hardell, B. Prakash, *Tribol. Int.*41 (2008) 663–671.
- [8] "Experimental investigation of friction and wear in hotstamping of Usibor 1500P"
C. Dessain, P. Hein, L. Wilsius, C. Penazzi, J. Boher, J. Weikert, *Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Bad Harzburg, 2008*, pp. 217–227.