

Studio dei processi di coating per il rivestimento in ferrite di materiali SMC

E. Poskovic, L. Ferraris, F. Franchini, M. Actis Grande

I materiali magnetici trovano sempre più applicazione in diversi settori industriali, i quali richiedono diverse proprietà magnetiche con basse perdite nel ferro e design sempre più complessi. In tal ottica la ricerca ha portato a nuovi materiali, come ad esempio i Soft Magnetic Composites (SMC). I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo degli SMC al posto degli acciai laminati sono: correnti parassite inferiori, possibilità di geometrie complesse, percorso del flusso magnetico 3D, comportamento efficiente alle alte frequenze. La bassa resistenza meccanica a temperatura ambiente rappresenta un limite, che può essere superato adottando strati in grado di lavorare oltre i 600 °C e sopportare quindi trattamenti termici che possano conferire più solidità meccanica. In questo lavoro, è stato studiato un coating inorganico con particelle di nano-ferrite, adottando diversi particolari processi per rivestire le particelle ferromagnetiche e sono stati considerati tre tipi di ambienti di trattamento termico. La caratterizzazione degli SMC prodotti è stata eseguita attraverso misure di resistività elettrica e coercitività con l'obiettivo di selezionare il processo migliore.

PAROLE CHIAVE: MATERIALI MAGNETICI DOLCI COMPOSITI, METALLURGIA DELLE POLVERI, TURBULA MIXER, MULINO A PALETTE, COERCITIVITÀ, RESISTIVITÀ ELETTRICA, ANALISI METALLOGRAFICHE, FERRITE DOLCE;

INTRODUZIONE

I materiali magnetici trovano sempre più applicazione in diversi settori industriali [1]. Ad esempio, nelle macchine elettriche, i magneti permanenti (materiali magnetici duri) vengono utilizzati per produrre il flusso magnetico, mentre gli acciai laminati (materiali magnetici dolci) per realizzare il nucleo magnetico. Anche i dispositivi elettronici, induttori e filtri EMI sono preparati con materiali magnetici dolci [2, 3]. I magneti sono anche molto comuni nella sensoristica.

I materiali magnetici dolci possono essere suddivisi in varie famiglie: leghe ferro-silicio, leghe ferro-cobalto-vanadio, ferriti dolci, materiali magnetici amorfi, ecc. È importante abbinare un'elevata permeabilità magnetica a basse perdite nel ferro e forme di design innovative. In tal ottica, la ricerca ha portato a nuovi materiali, come ad esempio i Soft Magnetic Composites (SMC) [4, 5]. I materiali SMC sono preparati per compattazione di particelle ferromagnetiche, isolate da specifici layer che possono essere di natura organica o inorganica [6]. I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo degli SMC al posto degli acciai laminati sono: correnti parassite inferiori, possibilità di geometrie complesse, percorso del flusso magneti-

**Emir Poskovic, Luca Ferraris,
Fausto Franchini**

Politecnico di Torino, Dip. Energia, Italia

Marco Actis Grande

Politecnico di Torino, Dip. Scienza App. e Tecn., Italia

co 3D, comportamento efficiente alle alte frequenze. Le basse resistenze meccaniche, tuttavia, rappresentano un limite, che può essere superato adottando strati di layer isolante in grado di resistere oltre i 600 °C [7]. In sostanza, in seguito alla pressatura, vengono effettuati trattamenti termici di stress relieving al fine di ridurre le perdite per isteresi magnetica e le sollecitazioni meccaniche di trazione presenti sulla superficie dei materiali pressati. Tuttavia, la maggior parte dei rivestimenti adottati commercialmente e nel settore della ricerca, vanno incontro a un degrado dovuto al trattamento di stress relieving oltre i 600°C, perdendo le loro caratteristiche di isolamento.

In questo lavoro è presentato lo studio di una tipologia di coating inorganico realizzato con particelle di nano-ferrite a copertura di micro particelle ferromagnetiche di Fe [8-10], adottando cinque differenti processi per rivestire la polvere ferromagnetica. Inoltre, sono state utilizzate tre differenti atmosfere durante il trattamento termico di stress relieving: in aria, vuoto e vapore. Lo studio, focalizzato sul trattamento termico, è atto a stabilire quali siano le migliori condizioni di trattamento a parità di tipologia di coating. Il numero di campioni testati in questo lavoro è molto numeroso, e per tale motivo l'efficacia del coating è stata valutata solamente attraverso delle caratterizzazioni preliminari, omettendo le misure delle perdite magnetiche (perdite d'isteresi e correnti parassite) e dei cicli d'isteresi, in quanto dispendiose in termini di tempo e necessarie solo nel caso in cui i test preliminari abbiano esito positivo. In tal ottica, la caratterizzazione è stata eseguita attraverso misure di resistività elettrica e misure di coercitività, parametri che risultano essere direttamente proporzionali rispettivamente alle perdite per correnti parassite e d'isteresi, con l'obiettivo di selezionare il processo di rivestimento e termico migliori. A supporto delle valutazioni dei campioni, saranno effettuate delle osservazioni delle polveri post miscelazione tramite microscopia ottica.

SCelta DEI MATERIALI E PROCESSI ADOTTATI

La polvere ferromagnetica deve soddisfare alcuni requisiti per poter essere impiegata; principalmente la polvere deve presentare un elevato grado di purezza e ottima comprimibilità, nell'ottica dell'ottenimento di un'elevata ripetibilità nella produzione dei campioni tramite compattazione della polvere. Per questo motivo, si è scelto di

usare una polvere di ferro denominata commercialmente Fe ABC100.30, prodotta tramite atomizzazione ad acqua e avente dimensione media della polvere di circa 100-150 µm. Un'altra importante peculiarità di questa tipologia di polvere è il basso tenore di ossigeno, il quale risulta da datasheet di 0,04 wt%. Le altre impurezze (C ed H) sono altrettanto trascurabili.

Per quel che concerne il materiale di rivestimento usato come isolante elettrico da inserire tra le particelle ferromagnetiche, si è adottata la polvere di ossido di ferro Fe₂O₃, comunemente definita come polvere di ferrite. Le dimensioni della polvere di ferrite, notevolmente inferiori rispetto a quelle della polvere ferromagnetica, sono nell'ordine di 100 nm. In aggiunta all'elevato isolamento elettrico, la polvere Fe₂O₃ presenta anche il vantaggio di consentire l'esecuzione di trattamenti termici a diversi intervalli di temperatura. Un'ulteriore peculiarità nella scelta della ferrite come layer di rivestimento è che tale polvere è un materiale magnetico dolce, e in quanto tale presenta delle proprietà magnetiche. Tali proprietà risultano essere interessanti nell'ottica della produzione di un materiale magnetico composito, poiché esso avrà, quindi, una frazione magnetica il più elevata possibile. Per finire, l'additivo ceroso Kenolube P11, prodotto dalla ditta Höganäs, viene utilizzato come lubrificante per migliorare la processabilità della miscela di polveri e mantenere una elevata densità del compatto ottenuto.

I processi di rivestimento studiati sono cinque, al fine di produrre due combinazioni di miscele di materiale composito, variando la quantità dello strato isolante: Fe ABC100.30 con 1 wt% e 0,2 wt% in peso di Fe₂O₃; inoltre, il Kenolube è stato mantenuto a 0,3 wt% in tutte le miscele. Inizialmente, la polvere ferromagnetica Fe ABC100.30 viene vagliata tramite dei setacci in tre intervalli granulometrici, per poi essere rimescolata con una nuova frazione granulometrica (vedi Tab. 1) in grado di fornire migliori risultati magnetici [11]. Per ottenere le miscele composte sono state adoperate due diverse tecniche: la miscelazione tramite la "Turbula Mixer" e quella eseguita con il mulino a palette. Entrambe le strategie sono di natura meccanica. I cinque processi di rivestimento sono delle combinazioni delle due tecniche. Inoltre la tecnica a mulino a palette viene successivamente suddivisa in due diversi sotto-processi, come illustrato nella Fig. 1.

Tab. 1 - Composizione granulometrica in percentuale di peso della polvere ferromagnetica Fe ABC100.30 originale e ricomposta / Granulometric composition in weight percentage of the original and recomposed Fe ABC100.30 ferromagnetic powder.

DENOMINAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE	COMPOSIZIONE (wt%)		
	S1	S2	S3
	>125 μm	63÷125 μm	< 63 μm
Frazione originale	25	43	32
Frazione rimescolata	50	30	20

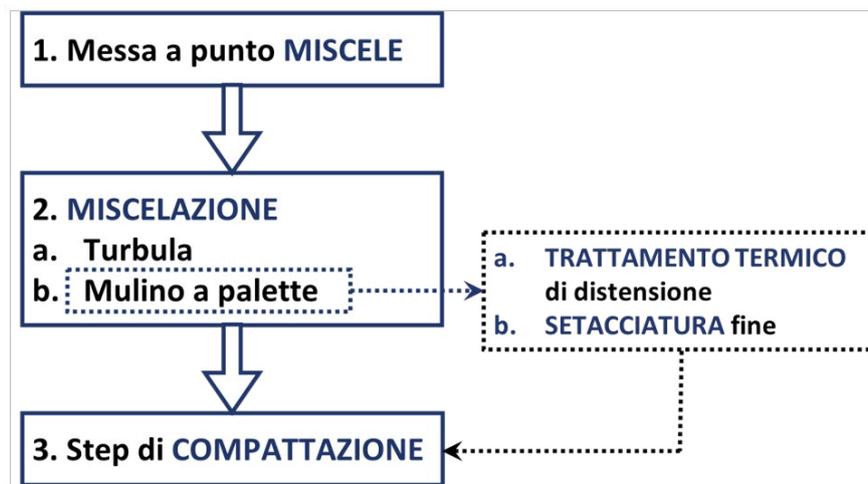


Fig.1 - Schema dei passaggi principali dei relativi processi di rivestimento / Scheme of the main steps of the related coating processes

La miscelazione con Turbula avviene in un tempo di 30 min; la polvere di ferro, isolante inorganico e lubrificante sono inseriti direttamente in mixer senza nessun precedente passaggio. Questa tecnica permette di raggiungere una buona uniformità in tempi relativamente brevi, rendendo questo metodo particolarmente efficiente. Nel caso del mulino a palette [12], inizialmente l'omogeneizzazione del composto viene effettuata inserendo solo la ferrite e le frazioni granulometriche ricomposte S1 e S2, per evitare che le particelle più piccole appartenenti all'intervallo S3 vadano a ricoprire quelle più grandi, creando così alcune aree non isolate elettricamente. Le polveri vengono processate nel mulino a palette per un tempo pari a 1 min. Al completamento di questa fase, la miscela viene poi unita alla frazione granulometrica S3 e al lubrificante Kenolube, e la miscelazione finale viene completata in Turbula per 30 min.

Questo metodo, tuttavia, introduce un incrudimento delle particelle e la produzione di una polvere finissima (< 1

μm) dovuto agli urti delle palette del mulino con le particelle di polvere. La deformazione plastica delle particelle rende più difficile il movimento dei domini magnetici causando di conseguenza ad un aumento delle perdite per isteresi magnetica. Si ipotizza, inoltre, che la componente fine della polvere di ferro possa andare a ricoprire le particelle più grandi influenzando sull'uniformità del rivestimento isolante. In tal ottica, sono state predisposte delle varianti di processo di rivestimento con il mulino a palette. Per fare fronte all'incrudimento delle polveri metalliche è stato inserito un passaggio tra l'omogeneizzazione nel mulino a palette e quella nella Turbula. La miscela viene sottoposta ad un trattamento termico di distensione a 450 °C per 30 min, trattamento che può essere svolto in aria o in vuoto [13]. Infine, per rimuovere le particelle di polvere finissime (< 1 μm) è stata eseguita un'ulteriore variante del processo di rivestimento con miscelazione ottenuta da mulino a palette con i seguenti passaggi: dapprima sono state messe nel mulino solo le frazioni granulometriche

rimescolate S1 e S2 e sono state processate per 1 min. Successivamente, la miscela ottenuta è stata setacciata con una maglia di 1 μm e reintrodotta nel mulino a palette insieme alla ferrite e rimescolata per un totale di 30 s. La miscela finale è stata poi ottenuta in Turbula seguendo la procedura dei processi spiegati in precedenza.

Una volta ottenute le miscele composte si procede con la compattazione green che avviene tramite pressatura uniassiale a freddo a 800 MPa. I campioni vengono pro-

dotti in forma di parallelepipedo 55x10x3 mm come in Fig. 2. Solitamente questa forma viene usata per una caratterizzazione magnetica tramite il metodo Single Sheet Tester (SST) [14-16] e per le prove meccaniche a flessione. Al fine di migliorare le proprietà dei campioni analizzati, questi sono stati sottoposti a tre tipologie di trattamenti termici di stress relieving: in aria, in vuoto ed in vapore. I trattamenti sono effettuati a 600 °C per 15 min.



Fig.2 - Campioni dopo vari trattamenti termici di stress relieving / Samples after various stress relieving heat treatments

ANALISI METALLOGRAFICHE

L'osservazione delle polveri è stata effettuata attraverso microscopia ottica in luce polarizzata. In Fig. 3 e Fig. 4 sono mostrate le polveri SMC contenenti lo 0,2 wt% di strato isolante. In Fig. 3-A si può osservare che la quantità di ferrite introdotta come isolante nel processo Turbula mixer (che appare in un color rosso vivo) non è sufficiente a rivestire le particelle, e solo alcuni granuli di polvere appaiono completamente ricoperti. Nel caso del mulino a palette (Fig. 3-B), la ferrite viene agglomerata al lubrificante: sono infatti visibili particelle sferiche di Kenolube totalmente rivestite di ferrite. Il rivestimento sulle polveri ferromagnetiche è discontinuo. In Fig. 3-C, è mostrato il processo di rivestimento con l'adozione del mulino a palette con post-trattamento in aria. Le polveri appaiono

ossidate (aventi colorazione molto scura) e solo scarsamente rivestite, mentre la ferrite riveste le particelle fini ed il Kenolube.

Nel caso di post-trattamento in vuoto (Fig. 4-A) la polvere appare ossidata, di colorazione scura, ed è evidente la quasi totale assenza del rivestimento di ferrite (in rosso). L'assenza di ferrite, in questo caso, è imputabile all'aspirazione della pompa a vuoto, che ha aspirato le nano particelle, evidenziando l'inefficacia del rivestimento. Infine, in Fig. 4-B è mostrato il rivestimento con mulino a palette senza polveri fini. In questo caso, la polvere appare uniformemente rivestita dal coating di nano ferrite.

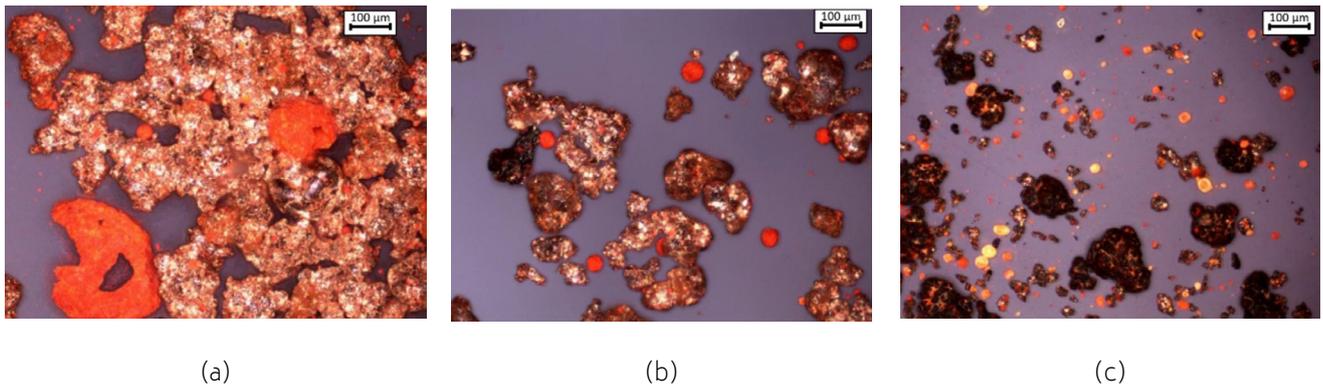


Fig.3 - A processo di rivestimento con solo Turbula Mixer / Coating process with only Turbula Mixer; B processo di rivestimento con Mulino a Palette - Coating process with Impact Mill e C processo di rivestimento con Mulino a Palette con Post-trattamento in Aria - Coating process with Post-Air treatment Impact Mill

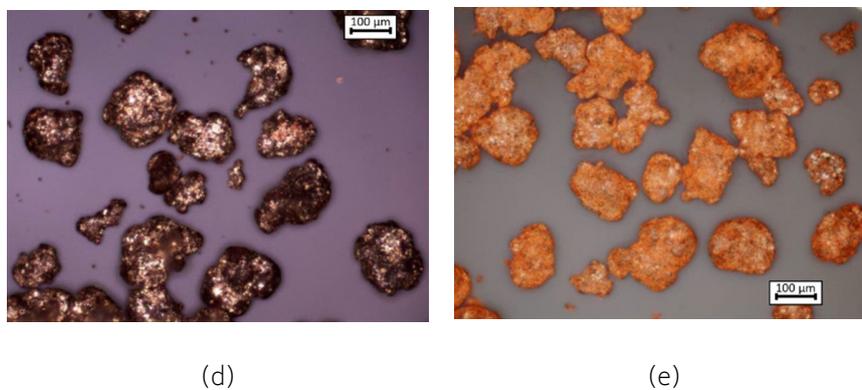


Fig.4 - A processo di rivestimento con Mulino a Palette con Post-trattamento in Vuoto / Coating process with Post-Vacuum treatment Impact Mill e B processo di rivestimento con Mulino a Palette Mulino a Palette senza Fini - Coating process with Dustless Impact Mill

MISURA DELLA COERCITIVITÀ

Le misure di coercitività vengono eseguite tramite il coercimetro (vedi Fig. 5), che effettua misure a bassissima frequenza (inferiore a 1 Hz). I valori dei campioni al verde dopo la pressatura sono riportati in Fig. 6-A dove si evince che i post trattamenti distensivi durante le fasi di rivestimento mostrano valori più elevati, soprattutto nel caso di processo in aria a 450 °C. Per quanto concerne il trattamento termico di stress relieving a 600 °C in aria, illustrato in Fig. 6-B, la riduzione della coercitività è più accentuata nei processi a mulino a palette con post-trattamento rispetto al caso green (massima differenza del 41%). Anche i valori minimi sono riferiti al processo di rivestimento con il post-trattamento a vuoto. Nel caso di trattamento termico di stress relieving a 600 °C in vuoto (vedi Fig. 7-A) si nota una riduzione rispetto al verde di circa il 50%. Per tutti processi di rivestimento si ha una

diminuzione percentuale pressoché uniforme, e il valore minimo è ottenuto per il processo con la Turbula.

Per concludere, il trattamento termico di stress relieving a 600 °C viene mostrato in Fig. 7-B. La differenza percentuale più ampia è stata misurata con il processo di rivestimento con mulino a palette con post-trattamento in aria. Tuttavia, per altri processi di rivestimento, la riduzione è intorno al 30%, dimostrando che il trattamento termico in vapore risulta il peggiore per quanto concerne la riduzione della coercitività. Per quanto riguarda la quantità dello strato isolante, per maggior parte dei casi la frazione minore allo 0,2 wt% risulta avere coercitività minore rispetto all'1 wt%. Comunque, le differenze in termini di coercitività al variare del contenuto di rivestimento in ferrite, nella maggioranza dei casi, sono dell'ordine di qualche percento, raggiungendo al massimo il 10%.

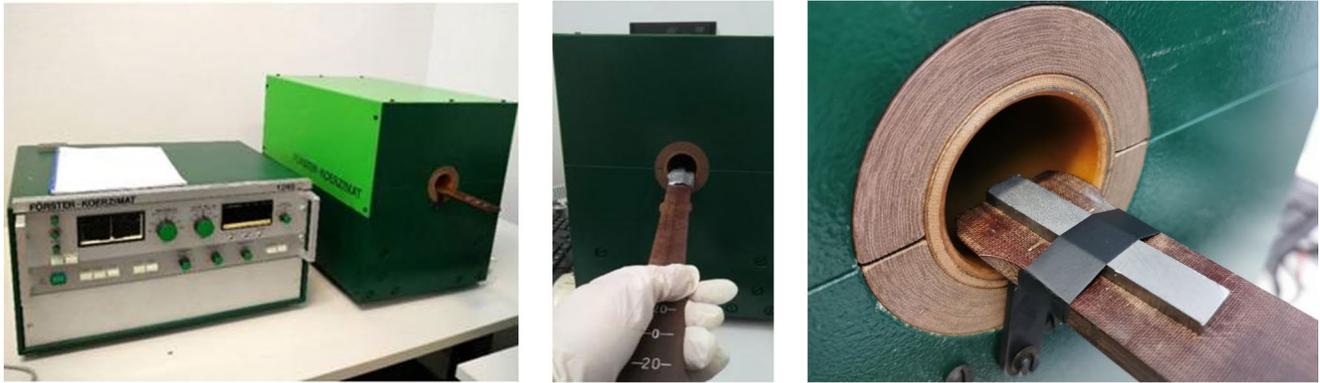


Fig.5 - Coercimetro con la prova in esecuzione / Coercimeter with test running

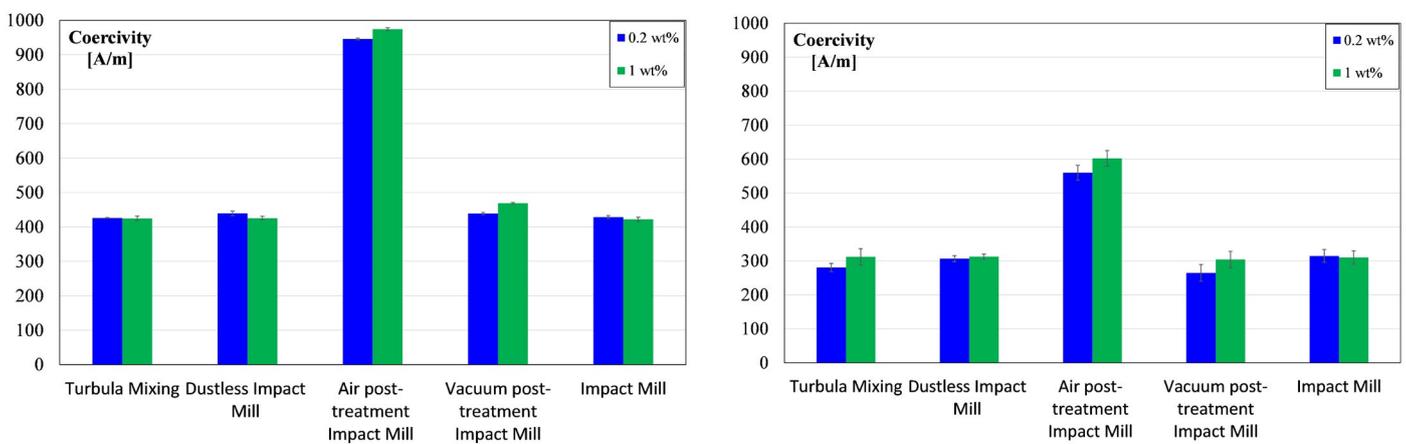


Fig.6 - Misura di coercività: A green e B dopo il trattamento termico in aria a 600°C / Coercivity measurement A green and B after heat treatment in air at 600°C

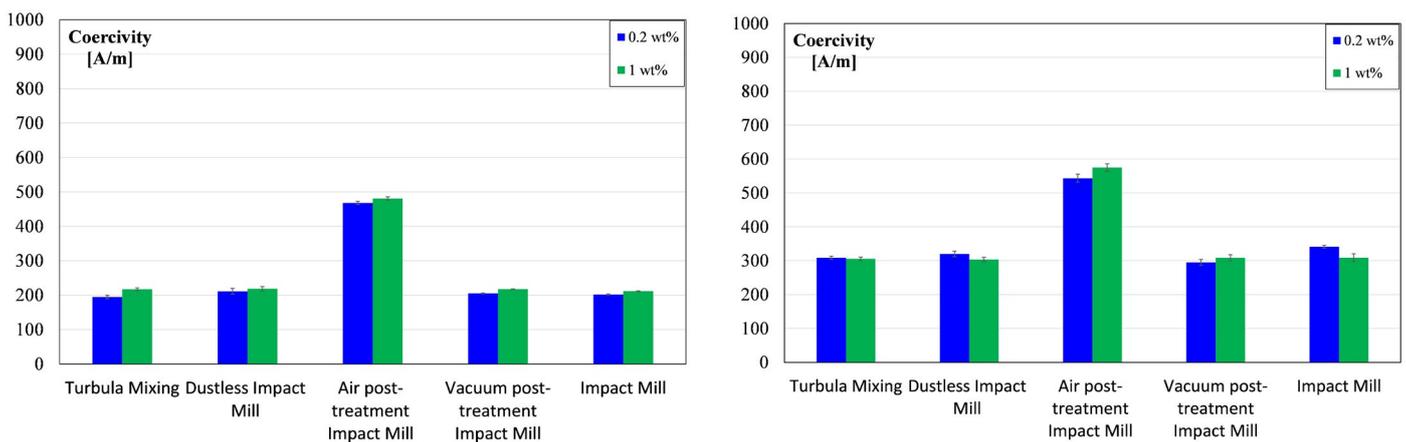


Fig.7 - Misura di coercività dopo il trattamento termico in vuoto A e in vapore B a 600°C / Coercivity measurement after heat treatment in vacuum A and steam B at 600°C

MISURA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA

I valori della resistività elettrica sono stati ricavati tramite la misura della resistenza elettrica. Per ottenere le misure di

resistenza è stato utilizzato un multimetro connesso ad una pinza, come mostrato in Fig. 8. In Fig. 9 -A vengono riportati i valori della resistività elettrica per il compatto in ver-

de. Si nota che solo il processo con il mulino a palette con post-trattamento in aria ha valori elevati di resistività, dovuto alla considerevole ossidazione. Inoltre, solo il mulino a palette senza particelle fini si avvicina alla soglia di almeno 200 $\mu\Omega\text{m}$. Questo conferma che il processo di rivestimento è stato il più uniforme. Tuttavia, si è osservata un'anomalia: con l'aumento della percentuale dello strato di isolante in ferrite, la resistività in generale diminuisce anziché aumentare. Questo inconveniente è inoltre da associare al comportamento inatteso e controproducente del lubrificante, che agglomera le particelle di nano-ferrite impedendo loro di rivestire il ferro, come osservato nelle diverse immagini in microscopia ottica. Il trattamento termico di

stress relieving a 600 °C in aria, mostrato in Fig. 9 -B, ha un effetto negativo sulla resistività, la quale è ridotta ai valori unitari di $\mu\Omega\text{m}$. I valori di resistività risultano ulteriormente diminuiti, al livello frazionario di $\mu\Omega\text{m}$, per i trattamenti termici di stress relieving a 600 °C in vuoto (Fig. 10-A) e in vapore (Fig. 10 -B). Considerando la quantità dello strato isolante, i risultati migliori si ottengono nel caso di 1 wt% di Fe_2O_3 per quasi tutti i trattamenti termici di stress relieving. Questo è in controtendenza rispetto ai valori ottenuti con il green. Per tale motivo, sarebbe necessaria un'analisi dettagliata tramite microscopia elettronica a scansione SEM.



Fig.8 - Misura della resistenza elettrica / Measurement of electrical resistance

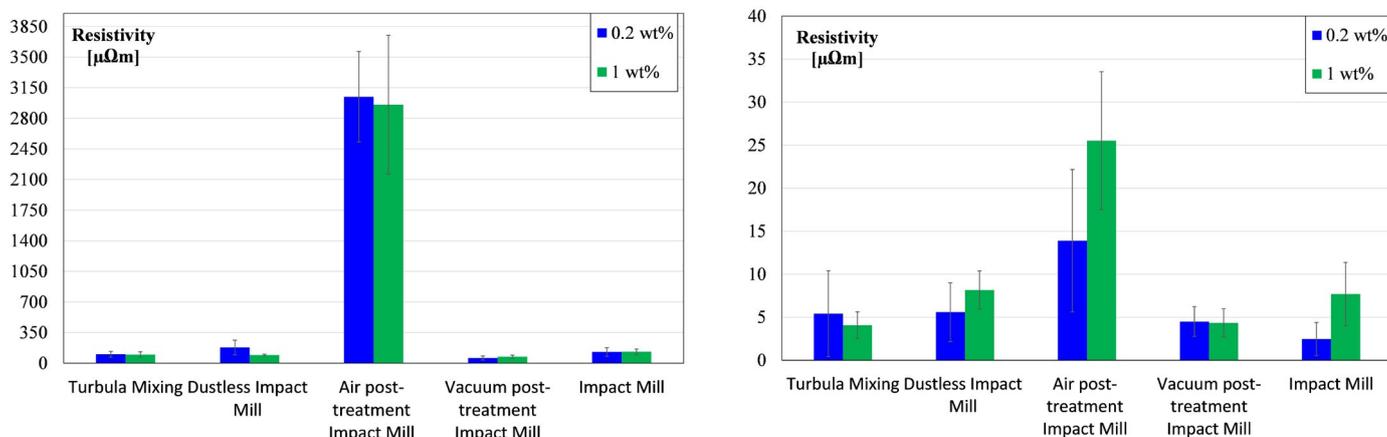


Fig.9 - Misura di resistività: A green e B dopo il trattamento termico in aria a 600°C / Resistivity measurement A green and B after heat treatment in air at 600°C

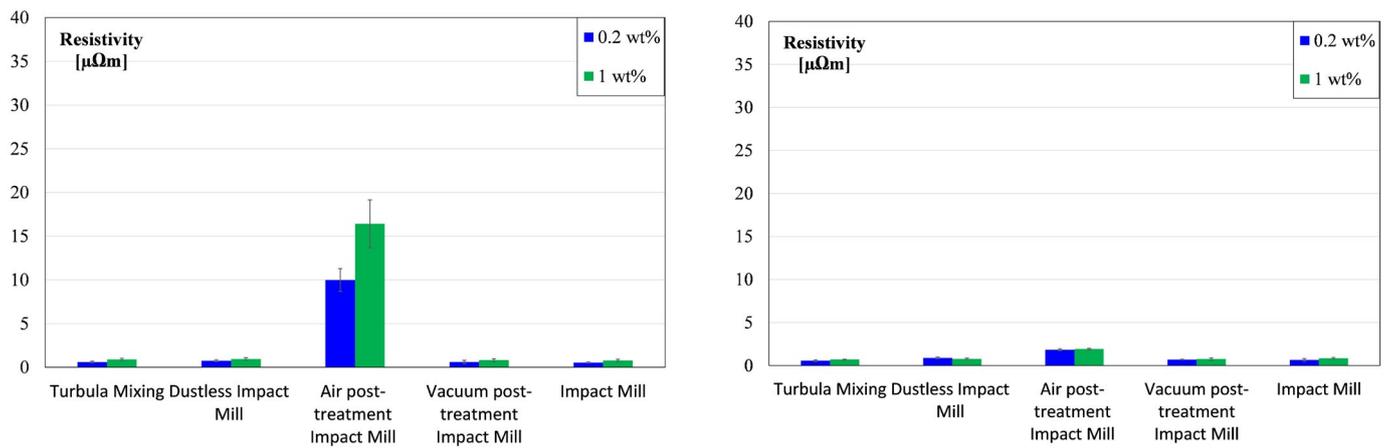


Fig.10 - Misura di resistività: e dopo il trattamento termico in vuoto A e in vapore B a 600°C / Resistivity measurement after heat treatment in vacuum A and steam B at 600°C

CONSIDERAZIONI FINALI

Dalle osservazioni al microscopio ottico, si evince che il processo di rivestimento più efficiente risulta essere il mulino a palette senza le particelle fini; tuttavia, dai dati di coercitività il miglior processo risulta essere quello con la turbula mixer. Inoltre, il trattamento termico di stress relieving a 600 °C in vuoto risulta la soluzione migliore per ridurre la coercitività. Nel caso dell'uso del mulino a palette con post-trattamento in aria la considerevole ossidazione delle polveri aumenta la resistività elettrica ma al contempo la coercitività risulta troppo elevata. Un buon risultato di resistività elettrica è ottenuto con il processo di rivestimento a mulino a palette senza le particelle fini. Tuttavia dopo vari trattamenti termici di stress relieving nessun risultato può essere considerato soddisfacente dal punto di vista dei valori di resistività. Inoltre, sono state riscontrate delle problematiche con l'uso del lubrificante Kenolube insieme alla ferrite nanometrica e difficoltà ad adoperare il vuoto durante la distensione delle polveri

per i processi di rivestimento con il mulino a palette. In sostanza, il processo di rivestimento in turbula mixer può essere migliorato riducendo il quantitativo di Kenolube e aggiungendo maggiore quantità di ferrite, in modo tale da ricoprire un numero maggiore di particelle ferromagnetiche, tuttavia sarebbe poi necessario sviluppare un metodo per asportare il quantitativo in eccesso di ferrite nanometrica. La stessa considerazione sulle problematiche del lubrificante Kenolube può essere fatta per il rivestimento con il mulino a palette senza le particelle fini. Tuttavia, durante l'attività con il mulino a palette un attento controllo di tempi e quantitativi di ferrite da aggiungere di volta in volta necessita ancora ulteriori approfondimenti. Inoltre si è notato che la ferrite utilizzata non risulta la più adatta, essendo soggetta ad una transizione di fase tra 450 °C e 500 °C. In futuro si potrà pensare di utilizzare altri tipi di ossido di ferro più stabili o con transizioni di fase a temperature maggiori.

RIFERIMENTI

- [1] J. M. SILVEYRA, E. FERRARA, D. L. HUBER, T. C. MONSON, "Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world", AAAS Science, 362, October 2018, doi: 10.1126/science.aao0195.
- [2] M. KAÇKI, M.S. RYLKO, J.G. HAYES, C.R. SULLIVAN, "Magnetic material selection for EMI filters", IEEE ECCE Conf., Cincinnati (USA), 1-5 October 2017; Conf. Proc. pp. 2350-2356, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096456.
- [3] J. HE, H. YUAN, M. NIE, H. GUO, H. YU, Z. LIU, R. SUN, "Soft magnetic materials for power inductors: State of art and future development," Materials Today Electronics, 6, 2023, 100066, ISSN 2772-9494, <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100066>.
- [4] E. A. PÉRIGO, B. WEIDENFELLER, P. KOLLÁR, J. FÜZER, "Past, present and future of soft magnetic composites", AIP Applied Physics Reviews 5 (2018).

- [5] R. BUREŠ, M. STREČKOVA, M. FABEROVA, P. KOLLAR, J. FUZER, "Advances in powder metallurgy soft magnetic composite materials", *Arch. of Metallurgy and Materials*, 62, 2017, pp. 1149-1154.
- [6] E. POŠKOVIĆ, F. FRANCHINI, L. FERRARIS, E. FRACCHIA, J. BIDULSKA, F. CAROSIO, R. BIDULSKY, M. ACTIS GRANDE, "Recent Advances in Multi-Functional Coatings for Soft Magnetic Composites", *MDPI Materials*, 14 (22), November 2021, doi: 10.3390/ma14226844.
- [7] E. POŠKOVIĆ, L. FERRARIS, F. FRANCHINI, R. BIDULSKY, M. ACTIS GRANDE, "Novel SMC Materials with the Insulating Layer Treated at High Temperature", *EPMA EURO PM2019*, Maastricht (Netherlands), 13÷16 October 2019, Conf. Proc..
- [8] J. FÜZER, M. STREČKOVÁ, S. DOBÁK, L. ĎÁKOVÁ, P. KOLLÁR, M. FÁBEROVÁ, R. BUREŠ, Y. OSADCHUK, P. KUREK, M. VOJTKO, "Innovative ferrite nanofibres reinforced soft magnetic composite with enhanced electrical resistivity", *J. of Alloys and Compounds*, 753, 2018, pp.219-227.
- [9] K. J. SUNDAY, F. G. HANEJKO, M. L. TAHERI, "Magnetic and microstructural properties of Fe₃O₄-coated Fe powder soft magnetic composites", *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 423, 2017, pp. 164-170.
- [10] B. MENG, B. YANG, X. ZHANG, B. ZHOU, X. LI, R. YU, "Combinatorial surface coating and greatly-improved soft magnetic performance of Fe/Fe₃O₄/resin composites," *Mater. Chem. Phys.* 2020, 242, 122478, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122478>.
- [11] EMIR POŠKOVIĆ, LUCA FERRARIS, FAUSTO FRANCHINI, MARCO ACTIS GRANDE; The effect of particle size on the core losses of soft magnetic composites. *AIP Advances* 1 March 2019; 9 (3): 035224.
- [12] E. POŠKOVIĆ, F. FRANCHINI, F. CAROSIO, M. ACTIS GRANDE, L. FERRARIS, "Application of impact mill technique for the production of soft magnetic composite materials," In *Proceedings of the AIM 2020*, Naples, Italy, 20 January 2021
- [13] G. ZHAO, C. WU, M. YAN, "Enhanced magnetic properties of Fe soft magnetic composites by surface oxidation", *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 399, 2016, pp. 51-57.
- [14] C. APPINO, E. FERRARA, F. FIORILLO, L. ROCCHINO, C. RAGUSA, J. SIEVERT, T. BELGRAND, C. WANG, P. DENKE, S. SIEBERT, Y. NORGREN, K. GRAMM, S. NORMAN, R. LYKE, M. ALBRECHT, X. ZHOU, W. FAN, X. GUO, M. HALL, "International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel", *International J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 48, 2015, pp. 123-133.
- [15] E. POŠKOVIĆ, F. FRANCHINI, L. FERRARIS, F. CAROSIO, M. ACTIS GRANDE, "Rapid Characterization Method for SMC Materials for a Preliminary Selection", *MDPI. Appl. Sci.*, 11 (24), December 2021, doi: 10.3390/app112412133.
- [16] Z. GMYREK, "Single Sheet Tester With Variable Dimensions," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 65 (7), pp. 1661-1668, July 2016, doi: 10.1109/TIM.2016.2540839.

Study of coating processes for SMC materials with ferrite layer

Magnetic materials are increasingly being used in various industrial sectors, that require different magnetic properties with low iron losses and increasingly complex shape designs. From this perspective, the research has led to new materials, such as Soft Magnetic Composites (SMC). The main advantages deriving from using SMCs instead of laminated steels are lower eddy currents, the possibility of complex geometries, 3D magnetic flux path, and efficient behavior at high frequencies. However, a low mechanical strength at ambient temperature represents a limit, which can be overcome by adopting layers capable of working over 600 °C, and thus withstand thermal treatments, which could add better mechanical strength. In this work, an inorganic coating with nano-ferrite particles was investigated; adopting several particular processes to coat the ferromagnetic particles and three types of heat treatment environments were considered. The characterization of the obtained SMC was performed through electrical resistivity and coercivity measurements with the aim of selecting the best process.

KEYWORDS: SOFT MAGNETIC COMPOSITE MATERIALS, POWDER METALLURGY, TURBULA MIXER, IMPACT MILL, COERCIVITY, ELECTRICAL RESISTIVITY, METALLOGRAPHIC ANALYSIS, SOFT FERRITE;

TORNA ALL'INDICE >



THE 4th WORLD CONGRESS ON CONDITION MONITORING

NH MILANO CONGRESS CENTRE · MILAN · ITALY

25-28 AUGUST, 2026



The 4th WCCM will take place on August 25-28, 2026, at NH Milano Congress Centre, Milan, Italy. The primary objective of the World Congress on Condition Monitoring (WCCM) is to facilitate the global exchange of research and applications in Condition Monitoring (CM) and related areas, with a strong emphasis on scientific and technological advancements, industrial applications and international cooperation. The Congress serves as a worldwide platform for scientists and professionals from both academia and industry to share knowledge and insights. The event is organized in collaboration with condition monitoring and NDT societies worldwide.

Previous WCCMs

- 2017: WCCM 2017 London, UK
- 2019: WCCM 2019 Singapore
- 2024: WCCM 2024 Beijing, China

The congress technical programme includes:

- Plenary keynote presentations
- Distinguished overview presentations
- Invited and contributed presentations, including case study presentations
- Industrial sessions for major industrial sectors
- Workshops/tutorials on advanced topics in condition monitoring, led by recognised scientists and engineers
- Expert panel session on hot topics in condition monitoring and related areas
- Exhibition, vendor presentations and a plenary spotlight session for exhibitors and sponsors

Key Dates

- Deadline for abstract submission:.....January 30, 2026
- Notification of abstract acceptance:..... February 28, 2026
- Deadline for submission of full papers (Optional):.....April 30, 2026
- Notification of full paper acceptance.....May 31, 2026
- Deadline for registration and payment for early bird:.....June 10, 2026
- Standard Registration Deadline:.....July 31, 2026

Venue

NH Milano Congress centre. Address: Strada 2, 7, Assago (MI) - Italy.
NH Milano Congress Centre is located in Assago, Milan business district just 15 minutes away from the city center and nearby the vibrant Navigli area.

Exhibition & Sponsorship

The detailed exhibiting and sponsorship packages will be available on the WCCM 2026 website in the following months. In the meantime, companies interested in taking part in the Exhibition or sponsoring the event may contact the organizing secretariat.

Congress chairpersons:



Prof. Dr. Len Gelman
The University of Huddersfield, UK



Prof. Dr. Hamid Reza Karimi
Politecnico di Milano, Italy

Contact Information

For inquiries, contact:



**ASSOCIAZIONE
ITALIANA DI
METALLURGIA**

- E-mail: conference@aimnet.it
- Phone: +39 02-76021132
- Website: www.aimnet.it/wccm2026

Social media

Follow us for updates:

