

Stampante metalli Metal-X

La manifattura additiva di componenti metallici rappresenta oggi una delle frontiere più promettenti per la produzione di parti a geometria complessa, la riduzione degli sfridi di lavorazione e l'alleggerimento dei componenti in un'ottica di ecodesign. Nell'ambito dell'infrastruttura MAIA, la stampante Metal X permette di realizzare componenti metallici funzionali partendo da un filamento polimerico caricato con polvere metallica, secondo un processo a filamento accessibile e flessibile, alternativo alle tradizionali tecnologie a letto di polvere.

La tecnologia impiegata era originariamente denominata dalla Markforged ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) ed è oggi indicata più in generale come MFFF (Metal Fused Filament Fabrication). Rispetto alle tecnologie sottrattive e di fonderia, questo approccio consente di ottenere componenti con pesi sensibilmente inferiori mantenendo funzionalità analoghe, contribuendo così alla riduzione dell'impiego di materie prime e alla sostenibilità del processo produttivo.

MAIA & Metal X

L'impianto Metal X presente in MAIA è costituito da tre unità distinte che coprono l'intero ciclo di produzione:

- una **stampante 3D a filamento** con doppio ugello (metallo e ceramico), che realizza l'oggetto in forma "green";
- un **sistema di lavaggio (Wash 1)**, contenente solvente, che rimuove parte del legante polimerico ceroso;
- un **forno di sinterizzazione (Sinter 1)**, che trasforma il componente green in un solido metallico.

Il processo di stampa (metal FFF, *Fused Filament Fabrication*) ricalca la tecnica FDM: il filamento polimerico-ceroso caricato con polvere metallica, proveniente da bobine, viene riscaldato, estruso e depositato strato dopo strato in cordoni, secondo il modello digitale 3D (file STL) inviato alla stampante.

Al termine della stampa, l'oggetto green — molto delicato — viene inserito nel Wash 1, contenente solvente (trans-1,2-dicloroetilene, $C_2H_2Cl_2$), che elimina parte del materiale polimerico ceroso. In questa fase la massa del green si riduce di una percentuale che varia in funzione del metallo: ad esempio, per l'Inconel 625 la riduzione deve essere pari al 3,8%, mentre per l'acciaio 17-4 PH è del 4,1%; qualora il valore non venga raggiunto, è necessario un ulteriore ciclo di lavaggio.

La fase successiva, la sinterizzazione in forno, è quella fondamentale: elimina il legante residuo e trasforma il green in un solido metallico. Il tempo necessario è uguale per tutti i provini e dipende esclusivamente dal tipo di materiale. I gas utilizzati sono argon puro e una miscela di argon e idrogeno (97,1% Ar, 2,9% H_2). I limiti dimensionali della tecnica sono definiti dalle dimensioni del forno: nel caso del Sinter 1 la camera utile è di circa $235 \times 68 \times 80$ mm, con risoluzione lungo l'asse z compresa tra 50 e 125 μm a sinterizzazione completata. La geometria interna delle parti può essere alleggerita con celle chiuse triangolari e a giroidi, oppure realizzata piena.

I materiali processabili comprendono un'ampia gamma di metalli: acciaio inossidabile **17-4 PH**, superlega di nichel **Inconel 625**, **rame** e acciai per utensili **A2** e **H13**, a copertura di esigenze applicative differenti.

Applicazioni e potenzialità

La tecnologia Metal X è stata validata in MAIA attraverso una serie di test di funzionalità volti a verificare i dati dichiarati dal costruttore in termini di densità finale raggiungibile e di precisione dimensionale rispetto al progetto. Sono stati realizzati campioni a geometria semplice per prove di resistenza a corrosione (in Inconel 625 con riempimento “solid fill”) e campioni a geometria complessa per la valutazione della flessibilità del processo; per un componente rappresentativo la stampa ha richiesto complessivamente circa 36 ore, con tempi stimati dal software Eiger.

La scelta dei materiali orienta i possibili campi di impiego. L'**Inconel 625**, superlega a base di nichel, unisce elevata resistenza meccanica, eccellente comportamento a corrosione e ossidazione anche ad alte temperature e ottima saldabilità: è impiegato in modo consolidato nei settori **energetico (componenti di turbine a gas, giranti e organi in ambiente aggressivo), aerospaziale, chimico e petrolchimico e marino**. L'acciaio inossidabile **17-4 PH**, indurente per precipitazione, è tra i materiali più diffusi e caratterizzati nella manifattura additiva a filamento metallico (ADAM/MFFF) e trova impiego dove servono buona resistenza meccanica e a corrosione insieme a durezza elevata, ad esempio in componenti strutturali, staffe e parti funzionali per l'industria manifatturiera.

Un valore aggiunto rilevante della tecnologia è il profilo di **sostenibilità**. Depositando materiale solo dove necessario, la manifattura additiva riduce sensibilmente gli sfridi rispetto alla lavorazione sottrattiva da pieno, con benefici in termini di minor consumo di risorse, di energia e di materie prime critiche. In un'ottica di economia circolare, la polvere metallica contenuta nei filamenti può inoltre essere ricavata da materiale di scarto — ad esempio dai trucioli metallici prodotti dalle lavorazioni meccaniche — chiudendo il ciclo del materiale.

Sul piano applicativo, la tecnologia si presta in particolare al **tooling**: realizzazione di attrezzature meccaniche personalizzate quali dime di saldatura, dime di controllo e montaggio e calibri di verifica. Trova inoltre impiego nella piccola componentistica meccanica per l'**automotive** e nella realizzazione di accessori personalizzati per il settore **moda**, grazie a un flusso di produzione additiva end-to-end che porta rapidamente dalla progettazione al componente in metallo. Grazie all'ottimizzazione topologica, la tecnologia consente inoltre componenti **alleggeriti** e funzionalmente integrati, con riduzione del numero di parti. Ne derivano benefici diretti in termini di **ecodesign, sostenibilità e durabilità** dei componenti, verificabile anche mediante controlli non distruttivi. I principali ambiti applicativi restano l'energetico, l'aerospaziale, i trasporti e il biomedicale.

Bibliografia

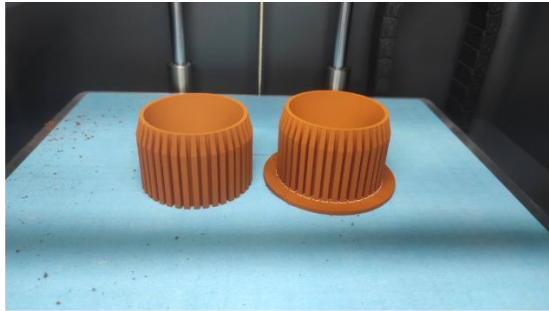
Rosnitschek, T.; Stierle, C.; Orgeldinger, C.; Seynstaahl, A.; Alber-Laukant, B.; Tremmel, S. *Dimensional Accuracy and Mechanical Characterization of Inconel 625 Components in Atomic Diffusion Additive Manufacturing*. Applied Mechanics 2024, 5(2), 376–390. DOI: 10.3390/applmech5020022.

Galati, M.; Minetola, P. *Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts*. Materials 2019, 12(24), 4122. DOI: 10.3390/ma12244122.

Kiswanto, G.; Kholil, A.; Istiyanto, J. *Effect of Infill Pattern on Impact Toughness, Microstructure, and Surface Roughness of Inconel 625 Built via Filament-Based Material Extrusion Additive Manufacturing*. Journal of Manufacturing and Materials Processing 2023, 7(3), 114. DOI: 10.3390/jmmp7030114.

Markforged Inc. *Metal X System — Datasheet / documentazione tecnica*. Disponibile su: markforged.com/3d-printers/metal-x.

Immagine rappresentativa



Componente in rame di un prototipo



Stampante Markforged Mark Two (MARK2)

Accanto alle tecnologie per la stampa di metalli, l'infrastruttura MAIA integra sistemi di manifattura additiva a filamento per la produzione di componenti in materiale composito ad alte prestazioni. La Markforged Mark Two risponde all'esigenza di realizzare, direttamente su banco, parti funzionali e prototipi con proprietà meccaniche paragonabili a quelle dell'alluminio lavorato, ma con peso significativamente ridotto: un contributo concreto ai principi di alleggerimento ed ecodesign.

La Mark Two è una stampante 3D professionale per compositi in fibra continua, costruita attorno a una monoscocca in alluminio che garantisce elevata accuratezza e replicabilità. Il tratto distintivo è la tecnologia **CFF (Continuous Filament Fabrication)**, che affianca alla comune **FFF (Fused Filament Fabrication)** la possibilità di inserire fibre continue di rinforzo all'interno della matrice termoplastica.

MAIA & Markforged Mark Two

Nella tecnologia FFF la stampante riscalda il filamento termoplastico (circa 200 °C) fino al punto di fusione e lo estrude attraverso l'ugello, costruendo il componente strato dopo strato. La stampa avviene all'interno di un box chiuso a pareti trasparenti, che permette di seguire tutte le fasi del processo; la macchina è collegata in rete e gestibile da remoto.

La Mark Two è dotata di un doppio sistema di estrusione: al filamento termoplastico affianca, tramite la tecnologia CFF di seconda generazione, la deposizione di **fibra continua a filamento lungo** all'interno della matrice. È possibile gestire i layer da rinforzare, la quantità di fibra, l'orientamento e il tipo di fibra rinforzante, ottenendo componenti che possono risultare resistenti quanto l'alluminio lavorato a macchina.

Materiali termoplastici stampabili. Il materiale di punta è l'**Onyx**, nylon caricato con microfibra di carbonio corta che offre elevata resistenza, tenacità, resistenza chimica e al calore (HDT 140 °C) e una finitura superficiale nera opaca pressoché impeccabile; è circa 3,5 volte più resistente del nylon tradizionale e 1,4 volte più rigido dell'ABS. Sono inoltre disponibili il nylon (flessibile, resistente agli urti, a basso attrito) e, a seconda della configurazione della piattaforma, varianti quali Onyx FR (ignifugo, autoestinguente V-0), Onyx ESD (antistatico), Precise PLA, ULTEM™ 9085 e Smooth TPU 95A.

Fibre di rinforzo continue. Le parti possono essere rinforzate con:

- **Fibra di vetro** — rinforzo entry-level, 2,5 volte più resistente e 8 volte più rigido dell'Onyx;
- **Fibra di carbonio** — miglior rapporto resistenza/peso, 6 volte più resistente e 18 volte più rigida dell'Onyx; sostituisce parti in alluminio (6061-T6) con circa metà del peso;
- **Fibra aramidica (Kevlar®)** — elevata capacità di assorbimento dell'energia, ideale per componenti soggetti a carichi ripetuti e improvvisi;
- **Fibra di vetro HSHT (High Strength High Temperature)** — resistenza dell'alluminio ed elevata tolleranza al calore, 5 volte più resistente e 7 volte più rigida dell'Onyx.

Dati tecnici principali. Volume di stampa 320 × 132 × 154 mm; risoluzione lungo l'asse z di 100–250 µm; piano di stampa rimovibile con ripetibilità di 10 µm. Il flusso di lavoro dal CAD al componente è gestito tramite la piattaforma **Eiger**, integrata, connessa e operante da browser.

Applicazioni e potenzialità

L'ambito applicativo d'elezione della Mark Two è la produzione di **attrezzaggi e utensili di produzione (tooling)**: dime, maschere, staffe di posizionamento, ganasce morbide (soft jaws) e sistemi di afferraggio realizzati in Onyx rinforzato in fibra continua consentono di sostituire l'analogo utensile in alluminio lavorato con parti fino a resistenti quanto il metallo, ma circa il 40% più leggere, disponibili in tempi e costi nettamente inferiori. Applicazioni tipiche comprendono le maschere di posizionamento per operazioni di saldatura, le attrezzature di controllo qualità e i **gripper / organi di presa (end-of-arm)** per la robotica industriale.

La flessibilità dei materiali estende il campo d'impiego ai **prototipi funzionali e a componenti d'uso finale** a basso volume. Il rinforzo in fibra continua (carbonio, vetro, Kevlar®, vetro HSHT) permette di calibrare resistenza e rigidità in funzione del carico, mentre le varianti dedicate ampliano gli scenari: Onyx FR (ignifugo) e ULTEM™ 9085 per i requisiti di comportamento a fiamma, fumo e tossicità del settore aerospaziale; Onyx ESD per fixture e attrezzature che devono operare in ambienti a scarica elettrostatica controllata, tipici dell'elettronica. I settori di riferimento sono l'industriale/manifatturiero, l'automotive, l'aerospaziale, l'elettronica e la ricerca ingegneristica.

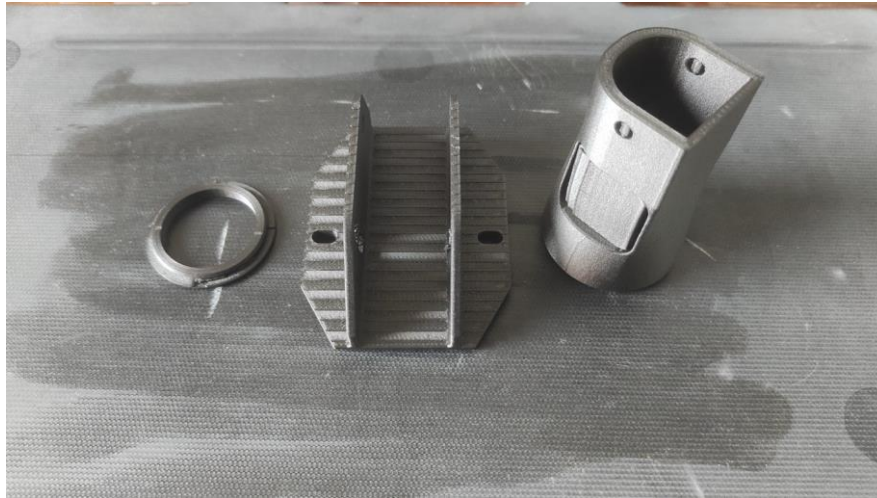
Presso l'infrastruttura MAIA la Mark Two è stata impiegata per realizzare **componenti dimostrativi reali** in Onyx con rinforzo in fibra continua — tra cui una montatura orientabile per ottica, ghiera filettate, corpi tubolari e provini a pattern reticolare — a conferma delle potenzialità della tecnologia nella prototipazione funzionale e negli attrezzaggi (cfr. immagini in calce).

Sostituendo utensili metallici con componenti compositi **alleggeriti** prodotti su banco, la Mark Two riduce lead time, costi e consumo di materie prime critiche. In coerenza con gli obiettivi dell'infrastruttura MAIA, questo approccio risponde ai principi di **ecodesign, sostenibilità e durabilità**, offrendo un'alternativa a minor impatto rispetto alla produzione di parti metalliche equivalenti.

Bibliografia

Markforged Inc. *Mark Two — Carbon Fiber 3D Printer, Datasheet (F-PR-2027) e specifiche tecniche*. Disponibile su: markforged.com/3d-printers/mark-two.

Immagini rappresentative



Componenti dimostrativi realizzati in MAIA con la Mark Two in Onyx: ghiera, corpo tubolare e montatura orientabile



Piano di stampa della Mark Two ("Mark Two ENEA CRC") a fine lavorazione, con provini a pattern reticolare e logo ENEA



REGIONE
LAZIO

