

HoMMage

Hysterese Design durch Nanostruktur-Engineering mit kontinuierlichen Umformprozessen

Bearbeiter:in Fansun Chi M. Sc. | David Löffler M. Sc
Laufzeit Januar 2020 – Dezember 2023
Abteilung Funktions- und Verbundbauweisen
Förderlinie SFB/TRR 270 – A09 (DFG)

Abstract

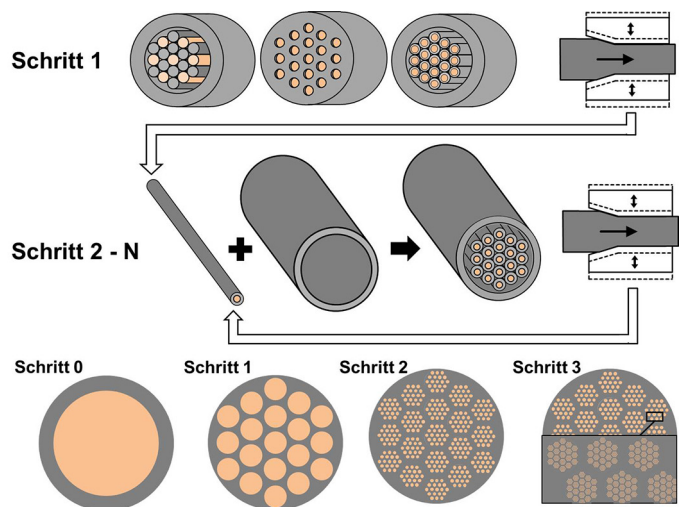
Für optimale permanentmagnetischen Eigenschaften ist die Mikrostruktur des Materials entscheidend. Dabei soll die Hauptphase (Körner) durch eine andere Phase (Korngrenzphase) umschlossen bzw. magnetisch entkoppelt werden. Beide Phasen sollen bestimmte Eigenschaften besitzen, um die Magnetisierungsmechanismen, wie z. B. Domänenwand-Pinning oder Nukleation, hervorzurufen. Zusätzlich wirken zahlreiche Parameter, wie z. B. die Ausrichtung und Größe der Körner sowie die Dicken der Korngrenze, auf die magnetischen Eigenschaften. Aktuelle Ansätze zur Herstellung und Erforschung von mikro- oder nanostrukturellen Funktionswerkstoffen basieren auf der Schmelz- oder Pulvermetallurgie sowie der chemischen Synthese. Diese Methoden sind nur für bestimmte Legierungen oder Phasenkombinationen anwendbar, da sie vom Phasendiagramm oder von den chemischen Eigenschaften abhängig sind. Auch die Einstellbarkeit der Mikrostrukturen durch diese Methoden sind begrenzt. Um die Eigenschaften von Permanentmagneten zu verbessern, wird im Projekt HoMMage die Mikrostruktur durch Umformung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen erzeugt.

Projektbeschreibung

Eine vielversprechende Lösung zur Überwindung dieser Grenzen stellt die Umformung sogenannter Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (MMV) dar. MMV bestehen aus einer Matrix und mindestens einem weiteren Material, das in die Matrix eingebettet ist. Die im Projekt untersuchten MMV setzen sich aus Drähten und einem umgebenden Matrixmaterial zusammen. Die Drähte haben die Zusammensetzung der Hauptphase des magnetischen Materials und werden bei den Umformungsvorgängen in die gewünschte Nanostruktur überführt. Sie sind von einem Umhüllungsmaterial in Form von gebündelten Drähten, Matrix oder Beschichtung umgeben, welches die zweite Phase, bzw. Korngrenzphase, in der gewünschten Nanostruktur darstellt. Die Ausgangsstäbe werden kontinuierlich zu Drähten mit deutlich reduziertem Durchmesser umgeformt. Diese neuen Drähte werden zu Stäben gebündelt und wieder zu Drähten geformt. Dieser Schritt wird wiederholt, bis die Mikrostrukturen der Drähte die gewünschte Dimension erreicht haben, wie in Bild 1 dargestellt ist.

Der Ansatz, die Struktur des Querschnitts des MMVs im Nanometerbereich zu gestalten, eröffnet einen neuen Weg, um die Härtungsmechanismen der Nukleation und des Domänenwand-Pinnings durch die Skalierbarkeit des Nanostruktur-Designs zu untersuchen. Gleichzeitig können die Mechanismen

der plastischen Verformung und Kornverfeinerung von nicht-konventionellen Umformwerkstoffen untersucht werden.



[1] Konzept zur Umformung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen für magnetische Werkstoffe

Ergebnisse

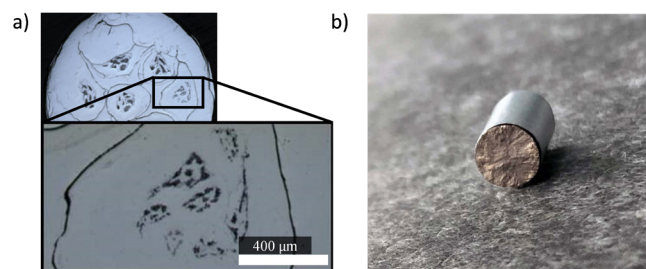
Im Rahmen erster Arbeiten mit NdFeB wurde gezeigt, dass der Materialfluss beim ersten Schritt des Rundknetens von Verbundstäben mit Materialpaarungen stark unterschiedlicher Fließkurven keine stationären Prozessbedingungen zulässt. Dies führt zu Problemen bei hohen Umformgraden, welche für die Herstellung von MMC notwendig sind. Als Voraussetzung für die Umsetzung des Verfahrens muss daher zunächst der Werkstofffluss beim Rundkneten von Zweikomponentenstäben in Abhängigkeit von den Prozess- und Werkstoffparametern verstanden werden. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projekts analytische und numerische Modelle erstellt, auf deren Grundlage geeignete Parameter für die Umformung gefunden werden können.

Es wurde ein analytisches Modell erstellt, das auf parametrisierten Stromfunktionen basiert. Die Modellparameter wurden mit Hilfe einer Minimierungsfunktion in Bezug auf die während der Umformung geleistete mechanische Arbeit (definiert als Funktion der Geometrie-, Material- und Reibungsparameter) bestimmt. Zusätzlich wurde ein numerisches Modell entwickelt, um die Spannungszustände für eine tieferegehende Analyse des Materialflusses zu untersuchen. Zur Validierung der beiden Modelle wurden Experimente auf einer Rundknetmaschine mit Va-

riation der untersuchten Prozessparameter (Materialpaarung, Ausgangsgeometrie und Oberflächenrauheit) durchgeführt. Als Werkstoffe wurden Edelstahl 1.4301 und 99 % ETP-Kupfer verwendet. Die Flächenverhältnisse der beiden Bauteile vor und nach dem Umformprozess werden durch den Parameter ΔA ausgedrückt, wobei ein Verhältnis $\Delta A = 1$ stationäre Prozessbedingungen bedeutet. Durch Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit und des Verhältnisses der Ausgangsdurchmesser der Bauteile lassen sich auch bei Werkstoffen mit stark unterschiedlicher Festigkeit nahezu stationäre Umformbedingungen einstellen. Diese Erkenntnisse können auf das Rundkneten der ersten Stufe von NdFeB-MMCs übertragen werden und damit eine deutliche Verbesserung der Umformbarkeit erreichen. Die Ergebnisse hierzu wurden in [1] veröffentlicht.

Für die Umformoperation in der ersten Stufe muss das Material vollständig ummantelt sein, damit das spröde NdFeB umgeformt werden kann. Außerdem kann auf diese Weise eine Oxidation verhindert werden und es ist kein Austreten der flüssigen Nd-reichen Phase bei erhöhten Temperaturen möglich. Es wurde ein Konzept entwickelt, um das Rohr mittels Rundkneten zu verschließen und so die Probe zu umschließen. Verschiedene Dichtelemente, die durch Rundkneten in das Rohr eingebracht werden können, wurden experimentell untersucht. Die Verwendung von Hinterschneidungen bietet eine besonders hohe Druckstabilität der Dichtung.

Um weitere Stufen des MMC-Prozesses zu erreichen, wurden Vorversuche mit der Werkstoffpaarung Kupfer-1.4301 durchgeführt. Dabei wurden insbesondere der Füllfaktor des Stabbündels aus Stufe 0 und die Wandstärke der Rohre variiert. Es zeigt sich, dass sich bei niedrigem Füllfaktor und dünner Wandstärke keine MMC-Wabenstruktur ausbildet, sondern das Material in eine ungleichmäßige Form fließt. Um die gewünschte NdFeB-1.4301 MMC-Mikrostruktur zu erreichen, wurde der Füllfaktor der Bündel angepasst und die Rotationsbewegung des Vorschubs der Rundknetmaschine zwischen den Stufen abgewechselt, um den translatorischen Materialfluss zu verringern. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2a zu sehen. Anhand des Schliffbildes sind die Schwierigkeiten bei der Durchführung der Stufen 1 - 3 zu erkennen. Insbesondere die Wandstärke aus der 1.4301-Phase stellt eine Herausforderung im Prozess dar. Die ausreichende Wanddicke für eine problemlose Prozessdurchführung liegt bei > 2 mm. Zur Erzielung hartmagnetischer Eigenschaften ist, ausgehend von einer Zielkorngrözendicke von 5 nm im Endzustand und den Bedingungen stationärer Prozesse ($\Delta A = 1$), eine Ausgangswanddicke in Stufe 0 von $< 0,1$ mm erforderlich. In einem weiteren verfolgten Ansatz wird der Verbund um eine zusätzliche Edelstahlfolie (Abb. 2b) und eine Trennschicht erweitert. So können nach dem Schneiden der äußeren Edelstahlschale die vorgegebenen Wandstärken erreicht werden.



[2] a) MMC structure aus NdFeB (dunkel) und 1.4301 Edelstahl (hell) hergestellt durch Rundkneten und
b) NdFeB Magnet in einer Hülle aus Edelstahlfolie

Danksagung

Das vorgestellte Forschungsprojekt wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio SFB/TRR 270 – Teilprojekt A09 „Hysteresis design of magnetic materials for efficient energy conversion (HoMMage)“.

Quellen

[1] Groche, P., Löffler, D., Franceschi, A., & Chi, F. (2022). Continuous swaging of composite wire bundles through controlled material flow. *CIRP Annals*, 71(1), 257-260. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.03.014>

[2] Germann, T., Löffler, D., Becker, L., Heck, P., Groche, P. (2024). Axial Tube Sealing by Plastic Deformation via Rotary Swaging. In: Mocellin, K., Bouchard, P.O., Bigot, R., Balan, T. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41341-4_13

Gefördert durch



Sonderforschungsbereich

