



INNERE KÜHLKANÄLE: HERAUSFORDERUNGEN UND POTENZIAL FÜR ZAHNRADANWENDUNGEN

Innere Kühlkanäle haben sich als vielversprechend für die Leistungssteigerung von Komponenten wie Spritzgussformen und Raketentriebwerken erwiesen. Es wurde angenommen, dass diese konturnahen Kühlkanäle eine wertsteigernde Verbesserung von Zahnradsystemen darstellen. Es bestehen jedoch weiterhin Herausforderungen bei der Weiterentwicklung und Umsetzung dieser Konzepte.

Einer der besten Anwendungsfälle für die additive Fertigung (AM) mittels Pulverbettfusion (PBF) ist die Herstellung von inneren Kanälen, insbesondere von komplexen. Raketentriebwerke und Formen sind zwei Komponententypen, die sich diese Fähigkeit zunutze gemacht haben.

Bei Raketentriebwerken würden Kühlkanäle ansonsten in Dutzenden, wenn nicht Hunderten von Lötvorgängen hergestellt werden – wobei jeder einzelne das Potenzial hätte, das gesamte Bauteil unbrauchbar zu machen. Bei Formen könnte das Hartlöten oder andere traditionelle Verfahren wie das Bohren zum Einsatz kommen, jedoch würde Ihr Design in seiner Komplexität eingeschränkt sein und wahrscheinlich zu einer weniger effektiven Kühlung/Wärmeübertragung führen (siehe Abbildung 1). Somit hat sich die additive Fertigung als hervorragend geeignet erwiesen, um die Leistung von Bauteilen zu verbessern und/oder Fertigungsprozesse zu vereinfachen, indem sie die Anzahl der Arbeitsschritte für Bauteile reduziert, die Kühlkanäle erfordern. Allerdings weisen PBF-AM-Oberflächen eine hohe Rauheit und Welligkeit auf (siehe Abbildung 2). Diese Oberflächen bieten den Vorteil (für die Wärmeübertragung), dass sie eine sehr große Oberfläche aufweisen. Bei strömungsbasierten Systemen verursachen diese Oberflächen jedoch einen erheblichen Druckabfall und können zu Problemen wie unzureichender Strömung führen (was wiederum einen effektiven Wärmeaustausch behindert).

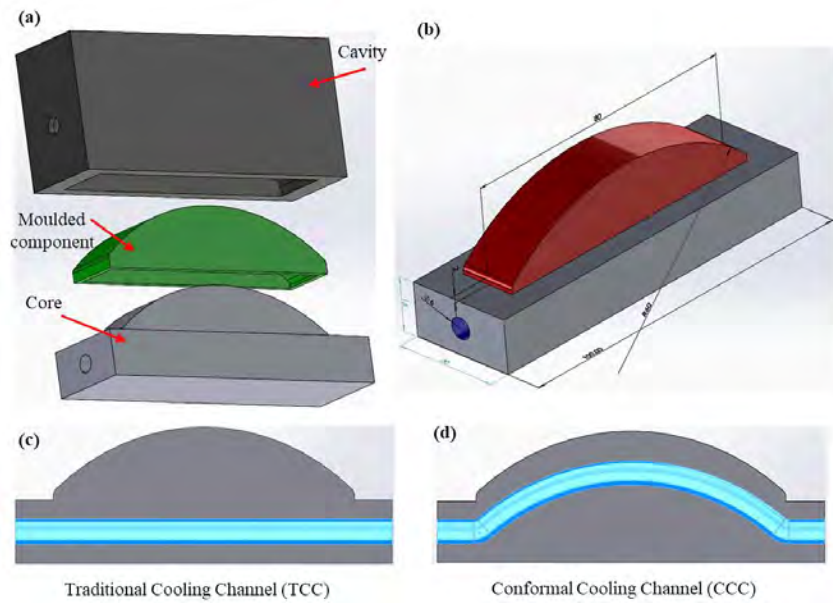


Abbildung 1: Beispiel für traditionelle vs. konturnahe Kühlkanäle in einem Formkern. [1]

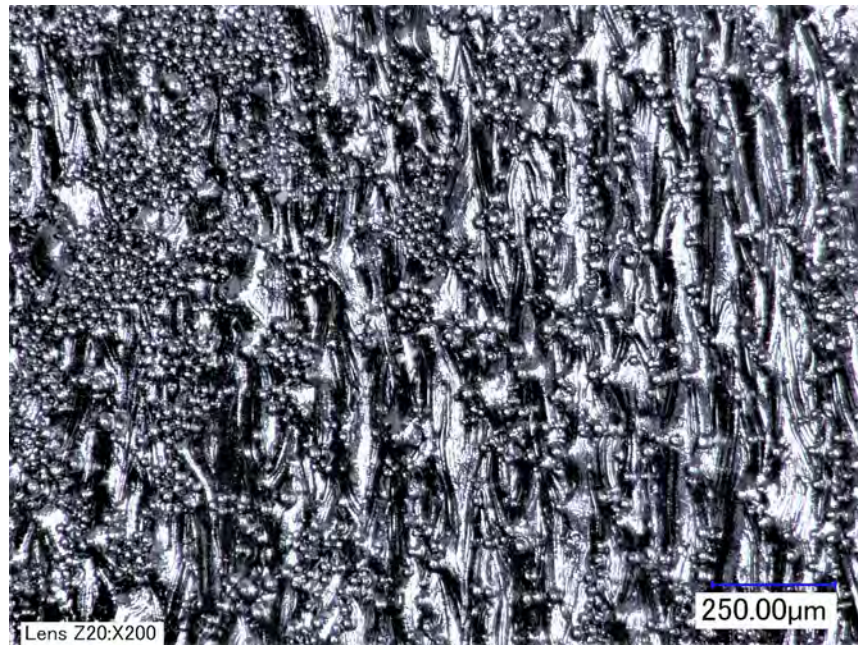


Abbildung 2: Die PBF-LB/Ti-6Al-4V-Oberfläche weist eine hohe Textur und Körnigkeit auf.

Obwohl Zahnräder keine so offensichtliche Anwendung für innere/konforme Kühlkanäle darstellen wie Raketentriebwerke oder Formen, sind sie dennoch eine interessante Anwendungsmöglichkeit, die es zu berücksichtigen gilt. Die Möglichkeit, die Betriebstemperatur von Zahnrädern zu steuern und/oder zu senken, könnte erhebliche Vorteile für das System mit sich bringen. Der vielleicht logischste Vorteil, den konforme Kühlkanäle (CCC) innerhalb eines Zahnradsystems bieten können, betrifft möglicherweise das Fressen. „Fressen ist das plötzliche Versagen der Schmierfilmschicht unter Betriebsbedingungen, das normalerweise unter hoher Last oder hoher Drehzahl auftritt.“ [2] Fressen steht in engem Zusammenhang mit der Betriebstemperatur, da ein Anstieg der Schmierstofftemperatur bekanntermaßen die Schmierfilmdicke verringert und somit das Risiko von Fressen erhöht. Es hat sich gezeigt, dass eine Verringerung der Oberflächenrauheit, insbesondere durch isotope Superfinish-Verfahren, die Fressbeständigkeit deutlich erhöht, sowohl aufgrund der Erhöhung der Dicke des Schmierfilmschicht als auch aufgrund der Verringerung der Reibung im Zahnradsystem (und der damit verbundenen Wärmeentwicklung) [1]. Daher verringert eine Reduzierung des Anstiegs der Betriebstemperatur eines Zahnradsystems das Risiko von Fressen.

AM-CCCs in Formen haben im Vergleich zu herkömmlichen Formkühlkanälen (TMCC) erhebliche Verbesserungen bei der Kühlzeit gezeigt. Wie erwartet, weisen diese AM-CCCs jedoch einen wesentlich höheren Druckabfall auf als TMCCs. Um die Temperaturhomogenität zu verbessern und die Effizienz der AM CCCs zu maximieren, sind Erhöhungen der Durchflussrate erforderlich [1]. Bei der Anwendung auf Zahnräder haben AM-CCCs das Potenzial, ähnliche Verbesserungen hinsichtlich der Bauteilkühlung und der daraus abgeleiteten Betriebstemperatur zu erzielen (siehe Abbildung 3 für ein Beispiel von Zahnrad-CCCs).

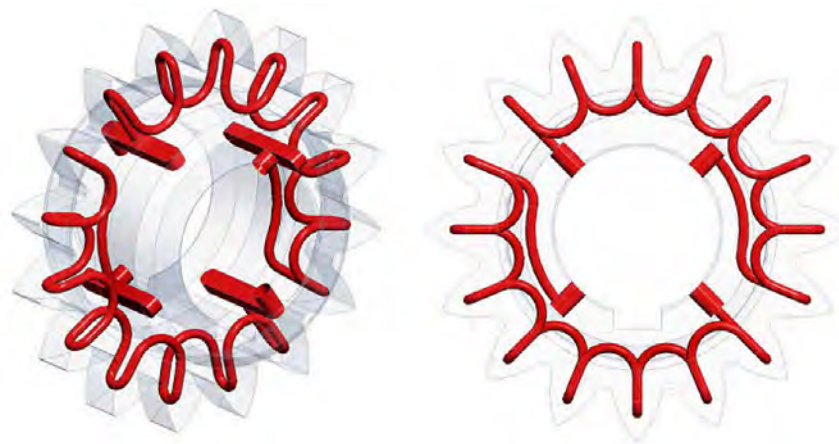


Abbildung 3: Konforme Kühlkanäle in einem Stirnrad. [3]

Eine Studie ergab, dass AM-CCCs die Widerstandsfähigkeit gegen Fressen im Vergleich zu herkömmlichen Zahnrädern um etwa 30 % erhöhen könnten [3]. Um auf die Probleme zurückzukommen, die durch die AM-Oberflächenstruktur innerhalb von CCCs in Bezug auf die Temperaturgleichmäßigkeit in Formkernen verursacht werden, muss man sich mit den Auswirkungen dieser Temperaturungleichmäßigkeit auf die Zahnradabmessungen befassen, da bekannt ist, dass die Dimensionsstabilität innerhalb von Formen unter diesen Bedingungen beeinträchtigt wird [4]. Da angenommen wird, dass Fressen teilweise mit einer Ausdehnung der Zahnräder aufgrund erhöhter Betriebstemperaturen zusammenhängt, müssen bei der Verwendung von AM-CCC in Zahnrädern die potenziellen Herausforderungen berücksichtigt und/oder angegangen werden, die mit einer hohen inneren Oberflächenrauheit verbunden sind, die zu Strömungs- und Temperaturunregelmäßigkeiten sowie zu möglichen Maßabweichungen aufgrund dieser Temperaturunregelmäßigkeiten führen kann.

Druckverluste innerhalb der Kanäle können durch höhere Durchflussraten kompensiert werden, allerdings können bei hohen Durchflussraten stärkere (größere/schwerere) Pumpen erforderlich sein. Da Fressen bei Zahnrädern in der Luft- und Raumfahrt (die unter hohen Drehzahlen und hohen Belastungen betrieben werden) häufig ein Problem darstellt, ist die Erhöhung des Gewichts eines Systems problematisch. Daher ist die Minimierung der Druckverluste an den AM-CCCs innerhalb der Zahnräder von größter Bedeutung für die Realisierbarkeit dieses Konzepts.

Die Herausforderungen bei der Herstellung von CCCs ohne AM lassen sich jedoch weitgehend mit den Herausforderungen bei der Verbesserung der Oberflächenrauheit von AM-Innenkanälen vergleichen. Diese CCCs verfügen naturgemäß nicht über einen Sichtzugang und sind in der Regel sehr klein, in einigen Fällen weniger als 1 mm. Daher können keine herkömmlichen Bearbeitungsverfahren zur Verbesserung dieser Oberflächen und zur Reduzierung ihrer Druckverluste in Betracht gezogen werden. Es wurden Konzepte mit fragwürdiger Wirksamkeit und Anwendbarkeit auf nicht gerade Kanäle, wie beispielsweise flexible Rotationswerkzeuge, vorgeschlagen. Allerdings gibt es keine Belege dafür, dass diese experimentellen Verfahren effektiv auf gewundene Kanäle angewendet werden können (daher sollten sie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht berücksichtigt werden). Elektrochemische Verfahren können nicht ohne Weiteres angewendet werden, da jeder Kontakt mit der Wand das Verfahren unwirksam macht. Daher können nur spontane chemische Prozesse oder abrasive Verfahren auf Kittbasis als praktikable Lösungen für die Herausforderungen der inneren Kanäle von additiv gefertigten Bauteilen in Betracht gezogen werden.

Beide Verfahren haben ihre Stärken und Schwächen, und diese Stärken und Schwächen müssen berücksichtigt werden, bevor man sich für eines entscheiden kann. In einer zukünftigen Kolumne werden diese Verfahren für die Oberflächenbearbeitung von Innenkanälen näher erläutert.

Artikel ist ein Teil der Reihe „Gear Solutions“ und ist unter der Lizenz CC BY veröffentlicht von: <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter/internal-cooling/>

REFERENZEN

1. Kadivar, M. Mcgranaghan, G., Tormey, D., "Effect of Surface Roughness on the Performance of Additive Manufactured Conformal Cooling Channels for Injection Moulds." IMC37 – 37th International Manufacturing Conference, Athlone Institute of Technology, Ireland, September 2021. https://www.researchgate.net/publication/354544758_Effect_of_surface_roughness_on_the_performance_of_additive_manufactured_conf
2. McCormick, M., "Materials Matter – Scuffing", Gear Solutions, September 2016. <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter-scuffing/>.
3. Dennig, H.J., Zumofen, L., Stierli, D. et al. Increasing the safety against scuffing of additive manufactured gear wheels by internal cooling channels. Forsch Ingenieurwes 86, 595–604 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00515-5>.
4. Hanzlik, J.; Vanek, J.; Pata, V.; Senkerik, V.; Polaskova, M.; Kruzalak, J.; Bednarik, M. The Impact of Surface Roughness on Conformal Cooling Channels for Injection Molding. Materials 2024, 17, 2477. <https://doi.org/10.3390/ma17112477>.