

Gradientenwerkstoffe

Gradientenwerkstoffe sind Komposite mit kontinuierlichem räumlichem Verlauf der chemischen Zusammensetzung, der Anteile einzelner Kompositbestandteile oder des strukturellen Aufbaus (z. B. Poren oder Korngröße). Mit der Variation dieser Parameter können die thermischen, mechanischen, elektrischen, optischen, magnetischen, biologischen oder auch ballistischen Eigenschaften des Werkstoffs beeinflusst werden. Von der Realisierung gradierter Eigenschaftsänderungen verspricht man sich daher eine gezielte Einstellung der Materialeigenschaften innerhalb eines dreidimensionalen Werkstücks. Im Vergleich zu konventionellen Verbundwerkstoffen gibt es hier außerdem keine abrupten Strukturübergänge, die speziell bei starker mechanischer oder thermischer Belastung Schwachstellen darstellen können. Seit Beginn ihrer Erforschung Mitte der 1980er Jahre konnten bereits bestimmte Varianten von Gradientenwerkstoffen realisiert werden, bemerkenswerte Dynamik hat ihre Entwicklung aber erst in jüngerer Zeit mit den Fortschritten bei additiven Fertigungsverfahren (sogenannter 3D-Druck) angenommen.

Das Konzept der Gradientenwerkstoffe mit kontinuierlichen Eigenschaftsübergängen wurde in Japan geprägt, indem sie nicht nur theoretisch beschrieben, sondern als Barriere für extreme thermische Spannungen, wie sie in der Raumfahrt auftreten, herangezogen wurden. Die präzise Einstellung von dreidimensionalen Verläufen ist technisch aufwendig. Aus diesem Grund beschränkte sich damals ihre Nutzung fast ausschließlich auf gradierte Oberflächen. Global gesehen ist seit 2008 jedoch eine erhöhte universitäre Forschungsdynamik im Bereich gradierter Massivwerkstoffe zu verzeichnen, die im Zusammenhang mit additiven Fertigungsverfahren steht. Von deren dynamischer Entwicklung profitieren Gradientenwerkstoffe, da hier lokal im Mikrometerbereich Ausgangsmaterialien verfestigt werden, was sie für die Gradierung von Werkstoffen prädestiniert. Diese Verfahren kommen auch dem Wunsch entgegen, spezielle Eigenschaften in einem Werkstückvolumen an exakt der Stelle des Bedarfs zu Verfügung zu stellen.

Je nach Materialsystem werden in aktuellen Forschungsarbeiten zu Gradientenwerkstoffen vorwiegend zwei Strategien verfolgt. So können Gradienten durch eine gezielte Variation des Mischungsverhältnisses der pulverförmigen Ausgangsmaterialien während der additiven Fertigung erzielt werden. Abhängig von der Anzahl der Zuführsysteme für diese Ausgangsmaterialien, aber auch der Präzision bei ihrer Steuerung, sind unterschiedlichste Materialgradienten, wie z. B. Wolframcarbid-Partikel in einer Stahlmatrix oder Graphen in einer Polymermatrix, denkbar. Die zweite Strategie betrifft Legierungen, bei denen eine Gradierung der Mikrostruktur durch Variation der Prozessparameter erreicht werden kann. So ist beispielsweise die Härte eines Stahls oder einer Nickelbasislegierung von der erzeugten Mikrostruktur abhängig, die mithilfe der gewählten Leistung des zur Aufschmelzung verwendeten Lasersystems eingestellt werden kann. Darüber hinaus werden additive Fertigungsverfahren zukünftig die Möglichkeit bieten, Erkenntnisse aus der Nutzung simulationsbasierter Verfahren zur Entwicklung neuartiger Werkstoffe und zur Optimierung von Multimaterialkombinationen zeitnäher einfließen zu lassen.

Gradientenwerkstoffe können für eine Vielzahl von Herausforderungen intelligente Lösungen bieten. Der Fokus liegt vermehrt auf Strukturwerkstoffen zur Nutzung bei sehr hohen Betriebstemperaturen, z. B. in Kraftwerken. Im Bereich der Energieerzeugung könnten Gradientenwerkstoffe darüber hinaus auch für Solarzellen und thermoelektrische Generatoren eingesetzt werden. Für Plattformen ist die Nutzung von Gradientenwerkstoffen speziell dann von Interesse, wenn unsymmetrische Belastungen auf ein Bauteil ausgeübt werden. Dies tritt aufgrund der erzeugten thermischen Belastung bei mit hohen Geschwindigkeiten fliegenden Flugkörpern oder Plattformen auf, ist aber insbesondere bei ballistischen Schutzmaterialien von Relevanz. Die verbreitete Anwendung von gradierten Metall-Keramik-Werkstoffen unter dem Aspekt der ballistischen Schutzwirkung könnte als Teil von passiven Panzerungssystemen re-

levant werden, was jedoch mit hohen Entwicklungskosten verknüpft wäre. Da die Ausbreitung von Wellen stark von Grenzflächen beeinflusst wird, können Gradientenwerkstoffe beispielsweise auch wirkungsvoll zur Dämpfung von Schall oder Vibrationen eingesetzt werden. Ein weiterer Aspekt im Bereich der Luftfahrt und auch der Automobilindustrie stellt das Crash-Verhalten der Materialien dar. Hinsichtlich der Zustandsüberwachung von Bauteilen könnten Gradientenwerkstoffe unabhängig von der Form des Bauteils als Grundlage für Verschleißindikatoren dienen. Das Gebiet der Kommunikation könnte ebenfalls von gradierten Werkstoffen profitieren, z. B. durch die Nutzung entsprechender Wellenleiter und Linsen in der optischen Kommunikation. Medizinprodukte könnten von einer maßgeschneiderten Anpassung an die zu erwartenden Belastungen und das umgebende Material profitieren.

Der jeweilige Zeitpunkt der Verfügbarkeit von Bauteilen aus Gradientenwerkstoffen ist eng mit dem im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen erreichbaren Kosten-Nutzen-Verhältnis verknüpft. Technisch machbar ist im Prinzip schon Einiges, allerdings verursacht eine Gradierung im Vergleich zu entsprechenden homogenen Werkstoffen relativ hohe Kosten, die durch Einsparungen aufgrund geringeren Wartungsaufwandes oder eingesparter teurer Bestandteile, wie z. B. von Seltenerd-elementen, wettgemacht werden müssen. Auch die Qualitätskontrolle, die eine verlässliche Zuordnung von Ort, physikalischen Parametern und korrelierter Eigenschaft sicherstellen muss, erzeugt einen erhöhten Aufwand. Für eine Vielzahl neuer Konzepte im Bereich der Werkstoffentwicklung, die unter dem Materials-by-Design-Ansatz zusammengefasst werden, sind Gradienten in Werkstoffen jedoch von grundlegender Bedeutung. Dabei werden die strukturellen Merkmale eines Werkstoffs von einer gewünschten Funktionalität und Anwendung ausgehend gezielt entworfen, also genau umgekehrt wie bei der traditionellen Vorgehensweise der evolutionären Werkstoffentwicklung.

Dr. Heike Brandt