

High-Entropy Alloys

High-Entropy Alloys (HEAs) bilden eine neue Klasse von Legierungen, in denen alle Elemente in etwa gleicher Teilchenanzahl vorliegen. Dies unterscheidet sie fundamental von klassischen Legierungen, bei denen ein Element wie z.B. Nickel (in Nickel-Basislegierungen) oder Eisen (in Stählen) den Hauptanteil, die sogenannte Basis, stellt, und alle weiteren Elemente in deutlich geringerem Anteil begleitend den Werkstoff bilden. HEAs werden erst seit Anfang der 2000er Jahre systematisch untersucht und befinden sich noch weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung. Seit einigen wenigen Jahren gewinnen sie international stark an Aufmerksamkeit, weil sie des Öfteren außergewöhnliche thermische, elektrische, magnetische und insbesondere mechanische Eigenschaften zeigen, die sie für Anwendungen beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt prädestinieren.

HEAs werden i.d.R. aus vier oder mehr metallischen Elementen hergestellt. Über die praktisch nutzbaren Eigenschaften hinaus regen sie durch die bislang bei Legierungen nicht in Erwägung gezogene äquimolare Zusammensetzung neue theoretische Konzepte und Diskussionen an. Insbesondere kann mit klassischen thermodynamischen Simulationsansätzen die Phasenbildung der Legierungen nicht korrekt vorausberechnet werden. Ebenso gibt es noch erhebliche Wissenslücken in Bezug auf den Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der HEAs, ihrer sich bildenden Mikrostruktur und den daraus resultierenden Eigenschaften, sodass noch immer sehr viele Laborversuche zur Erschließung dieses Gebietes nötig sind.

HEAs können auf unterschiedlichen Wegen hergestellt werden: Aus der Schmelze, aus dem festen Zustand oder über die Gasphase. Überwiegend wird der klassische Ansatz der Legierungsbildung über die Schmelze genutzt. Die Herstellung von HEAs aus dem festen Zustand erfolgt über Mahlen der Ausgangsstoffe in einer Hochenergiekugelmühle. Die Pulver werden anschließend pulvermetallurgisch weiterverarbeitet. Die durch Gasphasenprozesse

gebildeten Legierungen können einphasige sowie mehrphasige Mischkristalle sein, bei bestimmten Zusammensetzungen sowie Herstellbedingungen entstehen jedoch auch amorphe Legierungen, sogenannte Metallische Gläser. Ansonsten reicht die Struktur der gebildeten Gefüge vom einkristallinen über den nanokristallinen bis in den makrokristallinen Bereich.

HEAs vereinen häufig hohe Festigkeit und sehr gute Duktilität, was bisher eher als Widerspruch in sich gilt. Je nach ihrer Elementzusammensetzung können HEAs auch ein deutlich geringeres spezifisches Gewicht bei erheblich besseren mechanischen Eigenschaften besitzen als konventionelle Legierungen, was sie ggf. für Anwendungen im Leichtbau interessant macht. So wurden bei Raumtemperatur für ein HEA der Elemente Aluminium, Lithium, Magnesium, Scandium und Titan im Vergleich zu verschiedenen Al-Basislegierungen vergleichbarer Dichte (ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$) eine ca. dreibis dreißigfache Mikrohärtigkeit, eine vier- bis zwanzigfach höhere Fließgrenze und eine bis zu ca. dreifach höhere spezifische Festigkeit berichtet. Im Hinblick auf die Festigkeit kommt man hier mit einem metallischen Werkstoff also schon in den Bereich von Siliziumcarbid, einer Hochleistungskeramik. Auch in anderen Temperaturbereichen zeigen sich erste HEAs mit exzellenten mechanischen Eigenschaften. In der Domäne metallischer Feuerfestwerkstoffe wurden verschiedene HEAs aus fünf bis sechs Elementen synthetisiert, die um gut 20 Prozent höhere Fließgrenzen als z.B. die in diesem Bereich eingesetzten Nickel-Chrom-Basislegierungen zeigen und bei deutlich höheren Temperaturen, z.T. erst jenseits von 1.400°C versagen. Sie bestehen in der Regel aus Refraktärmetallen wie Titan, Zirkonium, Vanadium, Niob, Chrom oder Molybdän. Im Temperaturbereich deutlich unter 0°C , in dem viele konventionelle Legierungen zu Versprödungsversagen neigen, zeigt beispielsweise ein HEA aus Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt und Nickel sogar mit sinkender Temperatur sich noch verbessernde Messwerte (bis hinab zu -196°C).

In Bezug auf elektrische, magnetische und thermische Eigenschaften wurden bislang hauptsächlich HEAs aus Übergangsmetallen untersucht, z.B. im System Aluminium, Eisen, Kobalt, Nickel, Chrom. Ihre Wärmeleitfähigkeit liegt je nach exaktem Mischverhältnis der Elemente zwischen 10 und 30 W/mK . Sie entspricht damit in etwa der hochlegierter Stähle und Nickel-Basislegierungen, ebenso wie die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Erste Untersuchungen zu magnetischen Eigenschaften gehen von HEAs aus, die grundsätzlich Kobalt, Nickel und Eisen enthalten, dazu ein bis zwei weitere Metalle wie z.B. Aluminium, Silizium oder Kupfer. Durch temperaturabhängige Phasenübergänge zeigen diese Werkstoffe sich mit der Temperatur verändernde magnetische Eigenschaften, sind bei Raumtemperatur aber immer ferromagnetisch. Auch beim elektrischen Widerstand der bislang vermessenen HEAs zeigen sich signifikante Änderungen der Werte durch Hinzufügen oder Austausch einzelner Elemente sowie durch Gefügeveränderungen aufgrund von Wärmebehandlung. Bei einem HEA auf der Basis von Hafnium, Niob, Tantal, Titan und Zirkonium wurde unterhalb einer Sprungtemperatur von ca. $7,3 \text{ K}$ Supraleitfähigkeit festgestellt.

Weitere einzelne Untersuchungen umfassen die Anwendung von HEAs als diffusionshemmende Beschichtungen, zur Wasserstoffspeicherung, als Katalysatoren für chemische Reaktionen oder in Bezug auf ihre thermoelektrischen Eigenschaften. Da sich das Forschungsfeld überwiegend im frühen Laborstadium befindet, noch keine geeigneten Simulationsansätze zur Berechnung von Eigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Zusammensetzung sowie keine Hochdurchsatzanalytik vorhanden sind, können trotz aller vielversprechenden Einzelergebnisse signifikante bzw. kommerziell anwendungsrelevante Durchbrüche erst mittelfristig erwartet werden.

Stefan Reschke