

Beschleunigtes Kleben durch Mikrowellen-absorbierende Nanoferrite

Stefan Spiekermann, Hans Martin Sauer, SusTech GmbH & Co. KG, Darmstadt
Regine Hedderich, Forschungszentrum Karlsruhe – INT

Superparamagnetische Ferrite sorgen für schnelles und kontrolliertes Aushärten von Klebverbindungen im Mikrowellenfeld

Polyurethan- und Epoxidklebstoffe haben sich in der industriellen Fügetechnik und insbesondere bei der Verbindung moderner Leichtbaumaterialien einen festen Platz erobert: Beim Fahrzeugbau, bei der Herstellung komplexer Kunststoffformen oder in der Elektroindustrie erzielen sie hervorragende Festigkeitswerte und ermöglichen gerade bei Kunststoffen eine sehr genaue Abstimmung der elastischen Eigenschaften sowie die Korrektur von Fertigungstoleranzen.

Dass diese Klebstoffe durch Wärme gehärtet werden, verursacht in der Praxis jedoch Probleme. Kunststoffteile neigen bei Wärmebehandlung zur Verformung oder können sogar irreversibel geschädigt werden. Zur Lösung dieser Probleme wurde ein neuartiges Klebverfahren mit Nanoferriten vom NanoMat-Partner SusTech Darmstadt entwickelt



Bild 1: Durch Nanoferrite in einer Flüssigkeit lässt sich diese mit Magnetfeldern manipulieren

Heißkleben mit Hilfe von Rost?

Nanoferrite sind Eisenoxide, die mit Magnesium, Mangan, Nickel, Kupfer oder Zink dotiert sein können. Sie zeichnen sich durch eine große spezifische Oberfläche aus, lassen sich in nahezu allen flüssigen Medien

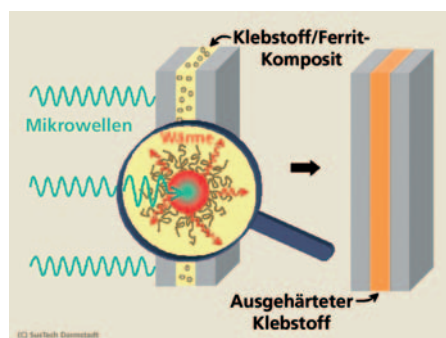


Bild 2: Wirkprinzip des „Bond-on-Command“: Mikrowellen werden eingestrahlt, die Partikel absorbieren die Energie und erwärmen sich. Der Klebstoff verfestigt sich „auf Kommando“

formulieren (**Bild 1**) und sind superparamagnetisch. Nanoferrite kommen als Pigmente, magnetische Sinterstoffe, Schmierstoffadditive, Rezeptorpartikel für Mikrowellen sowie in Abschirmschichten zum Einsatz. Sie werden in einer chemischen Fällungsreaktion aus Metallsalzen hergestellt. Im gleichen Arbeitsgang wird auch eine Oberflächenbeschichtung aus organischem Material aufgebracht. Diese verhindert das Zusammenwachsen der Partikel zu gewöhnlichem Ferritpulver.

Nanoskalige Ferrite mit maßgeschneiderter Zusammensetzung und Partikelgröße kleiner 30 nm eignen sich zum kontrollierten Wärmeeintrag in Klebstoffe, da sie eine besondere Wechselwirkung mit Mikrowellenstrahlung zeigen. Sie nehmen Energie aus elektromagnetischen Wechselfeldern auf und geben diese in Form von Wärme an die unmittelbare Umgebung ab (**Bild 2**). Dies ermöglicht einen schnellen, gezielten und lokal definierten Eintrag von Energie

und dadurch das „Schalten“ von Eigenschaften der umgebenden Matrix, zum Beispiel von Polymeren, die in der Regel sehr schlechte Mikrowellenabsorber sind. Da die Wärme direkt in der Klebeschicht freigesetzt wird, sinkt die Aushärtezeit im Vergleich zu herkömmlichen Methoden signifikant.

Nach dem gleichen Wirkprinzip lässt sich durch Zufuhr von Energie mit geeigneten Klebstoffen auch eine Trennung der Verklebung als Disbond-on-Command verwirklichen.

Nanoferrite besitzen nur eine einzige magnetische Domäne und weisen daher superparamagnetische Eigenschaften auf. Im angelegten äußeren Magnetfeld verhalten sie sich paramagnetisch mit einem außerordentlich großen magnetischen Moment. Die Magnetisierungskurve besitzt keine Hysterese. Dies ist eine der maßgeblichen Eigenschaften nanoskaliger Ferrite; sie führt dazu, dass nach dem Abschalten

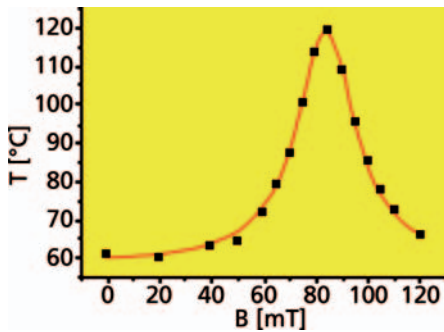


Bild 3: Mikrowellen-Absorptionskoeffizient über der magnetischen Feldstärke

des äußeren Magnetfeldes keinerlei Remanenzmagnetisierung verbleibt.

Energieaufnahme im elektromagnetischen Feld

In einem magnetischen Wechselfeld folgt die Ausrichtung der großen magnetischen Momente der superparamagnetischen Partikel dem magnetischen Feld mit einer gewissen Verzögerung. Dabei gibt es zwei verschiedene Relaxationsmechanismen. In hartmagnetischen Materialien sind die Spins und damit die magnetischen Momente direkt an die Kristallstruktur geknüpft, so dass das gesamte Partikel dem magnetischen Wechselfeld (Brown'sche Relaxation) folgt. In magnetisch weichen Materialien folgt nur das magnetische Moment dem äußeren magnetischen Wechselfeld, das Partikel selbst bewegt sich nicht (Néel'sche Relaxation).

Wenn die Frequenz des äußeren magnetischen Wechselfeldes dem Kehrwert der Relaxationszeit des Partikels entspricht, wird Energie durch die superparamagnetischen Partikel absorbiert und als Wärme an die Umgebung abgeleitet. Der Frequenzbereich, in dem diese superparamagnetische Relaxation der Nanoferrite beobachtet wird, liegt zwischen 1 kHz und einigen MHz. Die Energieabsorption kann

auch im höherfrequenten Gigahertzbereich beobachtet werden. Dann ist dafür allerdings ein anderer Mechanismus verantwortlich. Bei dieser hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung präzedieren die atomaren Spins gemeinsam um ein effektives Magnetfeld, das durch ein äußeres Magnetfeld zusätzlich moduliert werden kann. Dieser als ferromagnetische Resonanz bekannte Effekt führt bei einer spezifischen Magnetfeldstärke zu einem scharfen Peak der Mikrowellenabsorption (**Bild 3**) und damit zur Erwärmung des Materials. Besonders interessant ist die Tatsache, dass die Absorptionsfrequenz der Nanoferrite durch ein zusätzliches statisches Magnetfeld an der Klebnaht auf die behördlich genehmigten ISM-Frequenzen von 915 MHz oder 2,45 GHz abgestimmt werden kann. Möchte man also mit der üblichen Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz arbeiten, benötigt man eine Vormagnetisierung von $B = 85 \text{ mT}$ (das Erdmagnetfeld zum Vergleich: $20\text{--}30 \mu\text{T}$).

Intrinsischer Überhitzungsschutz

Jedes Nanoferrit besitzt eine spezifische Temperatur, die Curie-Temperatur, bei der die Magnetisierung verschwindet: Bei dieser Temperatur kann das Ferrit keine Strahlung mehr absorbieren. Über die Zusammensetzung des Ferrits lässt sich die Curie-Temperatur z.B. auf Werte zwischen 100°C und 200°C einstellen.

Daraus resultiert ein zusätzlicher Vorteil von Nanoferritadditiven in Klebstoffen: die intrinsische Temperaturbegrenzung durch die Curie-Temperatur verhindert die Überhitzung des Klebstoffs und der Füge-teile. Auch bei weiterer Mikrowelleneinstrahlung steigt die Temperatur in der Klebnaht daher nicht über die Curie-Temperatur, sofern nicht weitere Mikrowellenabsorber anwendend sind. Die eingekoppelte Mikrowellenenergie steht dann für diejenigen Teile der Klebnaht zur Verfügung, die z.B. aufgrund

ungünstigerer räumlicher Anordnung im Klebwerkzeug bis dahin zu wenig Energie absorbieren konnten.

Industriekompatible Anwendung

Nanoferrite zeigen ihre überlegenen Eigenschaften jedoch nur, wenn sie als isolierte Einzelteilchen (Primärpartikel) vorliegen und nicht zu größeren Agglomeraten (Sekundärpartikel) zusammengelagert sind. Dies setzt eine Modifizierung der Partikeloberfläche voraus, die genau auf die jeweilige chemische Umgebung der organischen Klebstoffmatrix abgestimmt sein muss. Voraussetzung für eine schnelle Verklebung bei gleichzeitigem intrinsischen Überhitzungsschutz ist die maßgeschneiderte Kombination von Ferritzusammensetzung, Partikelgröße, Funktionalisierung der Oberfläche Magnetisierung, Feststoffgehalt und Partikeldispersion im Klebstoff.

Neben der Formulierung der Klebstoffe kommt es vor allem auf die sachgerechte Mikrowellen-Bestrahlung der Füge-teile an. Für den Anwender ist es wichtig, dass die neue Technik in bestehende Fügeprozesse integriert werden kann. Die von Sustech hierfür entwickelten Anlagen nutzen Hohlleiter, die in die Klebwerkzeuge integriert sind, und durch die sich die Mikrowellen energie-effizient entlang der Klebnaht ausbreiten können (**Bild 4**). Die Handhabung der Füge-teile, der Klebstoffauftrag und sonstige Installationen werden kaum beeinflusst.

Fazit

Durch die Nanoferrit-unterstützte Mikrowellen-Klebtechnik lassen sich zahlreiche Probleme beheben, die gerade auch beim Kleben moderner Verbundwerkstoffe auftreten: Aufgrund der Energieabsorption direkt in der Klebnaht bleiben die Erwärmung und thermische Beeinflussung der Füge-teile gering. Die schlechte Wärmeleitung von Glasfasermaterialien und Thermoplasten ist kein störendes Hindernis, sondern im Gegenteil sogar ein Vorteil, da zur Aushärtung der Klebstoffe weniger Energie benötigt wird. Auch durch die besondere Eignung des Verfahrens für Leichtbaumaterialien und den reduzierten Energiebedarf ergeben sich interessante Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsaspekte.

Ansprechpartner:

Dr. Stefan Spiekermann
SusTech GmbH & Co. KG
Petersenstr. 20
D-64287 Darmstadt
Tel. 06151/16-7091
Fax 06151/16-7082

stefan.spiekermann@sustech.de
www.sustech.de



Bild 4: Laboraufbau zur Nanoferrit-unterstützten Mikrowellenaushärtung von Klebstoffen