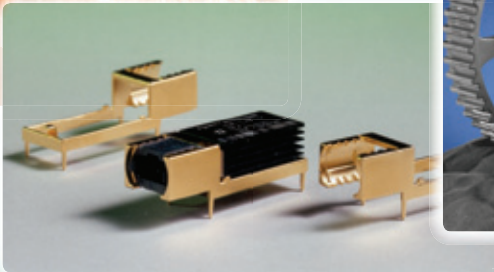


EINFÜHRUNG
in die

PULVERMETALLURGIE

VERFAHREN UND PRODUKTE

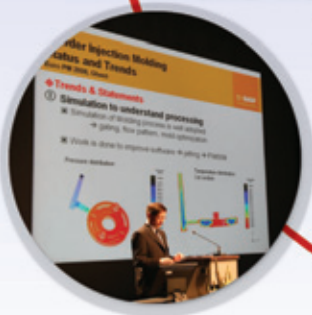


EUROPM

CONGRESS + EXHIBITION



An annual opportunity
to experience the
forefront of PM technology
and network with the PM industry's
leading manufacturers
and suppliers.



Find out more at

www.epma.com



Organised and sponsored by

EPMA

European Powder Metallurgy Association



Pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile (PM-Teile) sind gekennzeichnet durch hohe Formgenauigkeit, große und sehr differenzierte Legierungsvielfalt sowie ein breites Dichtespektrum von hochporös bis hochdicht. Entsprechend dieser metallurgisch-technischen Variationsvielfalt ist auch der Anwendungsbereich der PM-Bauteile außergewöhnlich breit.

Während der letzten Jahrzehnte wurde eine Vielzahl von PM-Teilen für verschiedenste Anwendungen im Automobil, in der Luft- und Raumfahrt, im Maschinenbau sowie in der Elektroindustrie entwickelt: hochdichte und hochfeste PM-Teile aus Eisen und Stahl, ölhaltige Sinterlager, Sinterfilter, Reibmaterialien, hochkomplizierte Metallspritzgussteile (MIM), Teile aus Aluminiumlegierungen, weich- und hartmagnetische Teile, gesintertes Hartmetall für Zerspanungswerkzeuge und Verschleißteile, ultraharte Diamantwerkzeuge sowie PM-Halbzeuge, wie Schnellstahl, Schwermetalle und Superlegierungen.

All diese Anwendungen haben dazu beigetragen, dass die Pulvermetallurgie immer weiter, entgegen dem Trend in anderen Technologiebereichen, wächst. Zum Teil zweistellige Zuwachsraten sprechen für diese hoch innovative Branche mit Zukunft. Die Vorteile pulvermetallurgisch

erzeugter Bauteile gegenüber z.B. gegossenen oder geschmiedeten Produkten liegen vor allem darin, dass die PM-Teile in vielen Fällen ohne eine mechanische Nachbearbeitung in hohen Stückzahlen auch bei komplexer Geometrie hergestellt werden können und zudem Legierungszusammensetzungen ermöglicht werden, die mit anderen Technologien nicht herstellbar sind.

Die hier vorliegende Broschüre wurde vom europäischen Verband der PM-Industrie, European Powder Metallurgy Association (EPMA) in englischer Sprache herausgegeben. Dankenswerterweise wurde uns der Nachdruck in deutscher Sprache erlaubt. Unserer besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback sowie Mitarbeitern des Fraunhofer IFAM Dresden und des Lehrstuhls Pulvermetallurgie, Sinter- und Verbundwerkstoffe der TU Dresden, die diese deutsche Übersetzung erstellt haben. Die deutsche Fassung wird vom Fachverband Pulvermetallurgie herausgegeben, dessen Mitgliedsunternehmen auf den nächsten Seiten einen bildhaften Überblick über die vielen Möglichkeiten der Pulvermetallurgie geben.

Dr. Michael Krehl
(Vorsitzender FPM)

Der Fachverband Pulvermetallurgie (FPM) ist die wirtschaftspolitische Interessenvertretung der Pulvermetallindustrie der Bundesrepublik Deutschland. Mitglieder im FPM sind Hersteller von Sintererzeugnissen, Eisen-, Stahl- und NE-Metallpulvern, Hartmetall und -Vorstoffen sowie Anlagen für die Sintertechnik einschließlich Unternehmen aus den deutschsprachigen Ländern Österreich, Schweiz und Luxemburg, die keine nationalen Verbände haben.

Im Mittelpunkt der Verbandsarbeit stehen die Erarbeitung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen, die Marktbeobachtung und Erörterung von Marktdaten, betriebswirtschaftlicher und technologischer Erfahrungsaustausch, die Abwehr unlauterer Marktpraktiken und Ausarbeitung gemeinschaftlicher Stellungnahmen zu unternehmens- oder marktrelevanten Gesetzesentwürfen, eine Verbandsstatistik, die Aufarbeitung der amtlichen Statistiken sowie die Mitarbeit in nationalen und internationalen Normungsgremien (DIN und ISO). Als besonders wichtige Verbandsaufgabe wird die Ausweitung des Marktes durch Erschließung neuer Einsatzfelder für PM-Erzeugnisse gesehen. Grundlage hierfür ist vielfach die Gemeinschaftsforschung, die insbesondere im Arbeitskreis Hartmetall seit vielen Jahren erfolgreich durchgeführt und von den Mitgliedern selbst finanziert wird.

Die Darstellung dieser Verbandsaktivitäten beschränkt sich auf die wesentlichen Felder und soll die große Breite der Verbandsaufgaben zeigen. Sie werden von den Mitarbeitern aller Mitgliedsunternehmen durch die Bereitschaft zur aktiven Mitarbeit in den verschiedenen Verbandsgremien getragen. Weitere Informationen zu den Mitgliedsunternehmen des FPM finden Sie unter www.pulvermetallurgie.com.

Der Fachverband Pulvermetallurgie ist zudem Mitgliedsverband des WSM Wirtschaftsverband

Stahl- und Metallverarbeitung e.V., der als einer der größten mittelständischen Wirtschaftsverbände mit knapp 81,5 Mrd. Euro Umsatz und etwa 457.000 Beschäftigten die gesamte Breite der stahl- und metallverarbeitenden Industrie repräsentiert. Der FPM ist damit über den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) in das Netzwerk der wirtschaftspolitischen Interessenvertretung der deutschen Industrie eingebunden. Der FPM war maßgeblich an der Gründung der European Powder Metallurgy Association (EPMA) beteiligt.

Hagener Symposium Pulvermetallurgie

Der FPM ist die geschäftsführende Trägergesellschaft des Gemeinschaftsausschusses für Pulvermetallurgie, einem technisch-wissenschaftlichen Gremium, das vom Fachverband Pulvermetallurgie (FPM), dem Verein Deutscher Ingenieure – Gesellschaft Materials Engineering (VDI-GME), dem Stahlinstitut VDEh, der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) und der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG) getragen wird.

Im Rahmen dieses Gemeinschaftsausschusses treffen regelmäßig alle nennenswerten Institute, die auf dem Gebiet der Pulvermetallurgie wissenschaftlich arbeiten, und die Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der PM-Industrie zusammen und tauschen sich über die laufenden Arbeiten und deren Ergebnisse sowie über Programme und Wege der staatlichen Forschungsförderungen aus. Es haben sich mehrere Expertenkreise gebildet, in denen die Mitglieder des FPM aktiv mitarbeiten (Metallpulvererzeugung, Metal Injection Moulding (MIM), Sintern, Sinteraluminium und Sinterstähle).

Der Gemeinschaftsausschuss führt Vortragsveranstaltungen und Seminare durch, in denen über Stand und Entwicklung jeweils besonders nommierter PM-Bereiche berichtet wird. Insbesondere die jährlich stattfindenden und vom FPM ausgerichteten „Hagener Symposien“ stellen eine Brücke zwischen Wissenschaft und Praxis, zwischen Herstellern und Anwendern dar.

Fachverband Pulvermetallurgie (FPM)
Vorstandsvorsitzender:
Dr. Michael Krehl, PMG Holding S.A.,
Luxembourg
Geschäftsführer:
Dipl.-Ökonom Dirk Hölscheid, Hagen

Vorteile für Mitglieder des FPM

- Förderung der PM- und Hartmetalltechnologie
- Ausbau der PM-Position in der Zulieferkette
- Informationen zu betriebswirtschaftlichen Themen
- Erstellung und Analyse von Statistiken
- Informationen zu Vormaterialmärkten
- Zuliefer-/Marktfragen, ArGeZ
- Unternehmensbesteuerung/Bilanzierung
- Umweltpolitik, Arbeitsschutz und REACH
- rechtspolitische Themen und Gutachten
- Gemeinschaftsforschung
- Mitarbeit in der Normung (DIN und ISO)



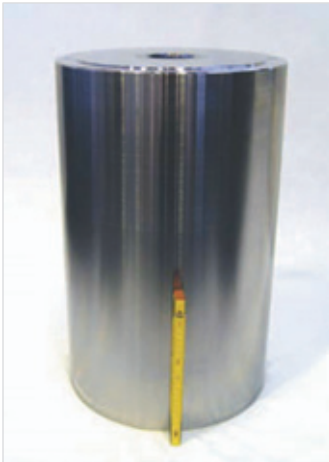
*Hager Symposium Pulvermetallurgie
mit begleitender Ausstellung*



Schiebemuffe (PMG Gruppe)



Hartmetallwälzfräser
(CERATIZIT Luxembourg S. à r.l.)



Hartmetall-Hochdruckbuchse (bis 3.500bar)
(TRIBO Hartstoff GmbH)



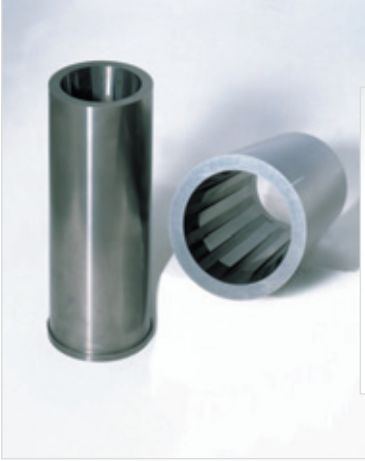
Ventilsitzringe und Ventileführungen
(Bleistahl Produktions GmbH & Co. KG)



Nockenwellenversteller
(Schunk Sintermetalltechnik GmbH)



Zahnradbearbeitung mit WIDIA-Wälzfräser
(Kennametal Deutschland GmbH)



Nutbuchsen aus Hartmetall
(G-ELIT Präzisionswerkzeug GmbH)



WIDIA-Frässystem M1200
(Kennametal Deutschland GmbH)



Planetenträger (PMG Gruppe)



Antriebsrad (MIM-Teil)
(Schunk Sintermetalltechnik GmbH)



Schaltwippe für Getriebe (GKN Sinter Metals)



Hartmetall-Miniplunger (bis 8.000bar)
(TRIBO Hartstoff GmbH)

Die **European Powder Metallurgy Association (EPMA)** ist eine internationale Verbandsorganisation, die sowohl Hersteller und Anwender aller Arten von Erzeugnissen der Pulvermetallurgie (PM), Anbieter von Material und Ausrüstungen für die Pulvermetallurgie als auch Forschungsinstitutionen und Persönlichkeiten mit Interesse an der Pulvermetallurgie vertritt.

Sie wurde 1989 als „Non-Profit“-Organisation gegründet und handelt als Vertreter der europäischen PM-Industrie im europäischen und im internationalen Bereich. Sie arbeitet mit einer Reihe von Organisationen zusammen, um Fragen mit strategischer Bedeutung für die globale Wettbewerbsfähigkeit der PM-Technologie zu behandeln. Diese Fragen beinhalten Umwelt- und Gesundheitsschutz, Sicherheit, Qualitätssicherung, Forschung, Ausbildung, Statistik, internationale Standards und die Förderung der PM-Technologie.

Sie hat eine Reihe von englischsprachigen Bildungsmaterialien herausgegeben, u. a. kostenlose Broschüren. Informationen über diese und andere Veröffentlichungen über den PM-Prozess, -Materialien und -Anwendungen finden Sie auf der EPMA-Homepage unter www.epma.com/onlinepublications.



Pulvermetallurgie –

Das Verfahren und seine Produkte

Das Original dieser Veröffentlichung wurde 1992 von Gordon Dowson geschrieben und 2008 grundlegend von David Whittaker überarbeitet.

© 1992 & 2008

European Powder Metallurgy Association

© 2010 dt. Fassung

Fachverband Pulvermetallurgie

Deutsche Übersetzung:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback

Unter Mitwirkung von Mitarbeitern des

Fraunhofer IFAM Dresden und des Lehrstuhls

Pulvermetallurgie, Sinter- und

Verbundwerkstoffe der TU Dresden

European Powder Metallurgy Association (EPMA)

Talbot House, 2nd Floor,
Market Street,
Shrewsbury, SY1 1LG
United Kingdom

Tel: +44 (0) 1743 248899

Fax: +44 (0) 1743 362968

E-Mail: info@epma.com

Internet: www.epma.com

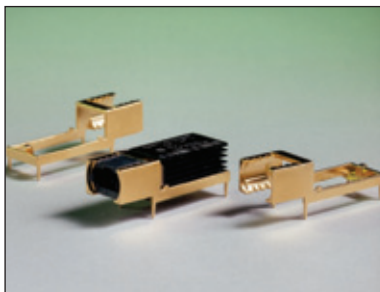
Inhalt

Einleitung	8	Nachbehandlung	24
Der Prozess	9	– Nachpressen	24
Warum werden Bauteile aus Pulver hergestellt?	9	– Heißisostatisches Pressen (HIP)	24
– Sinterformteile (Genauteile)	9	– Sinter-Schmieden	24
– Poröse Werkstoffe	10	– Oberflächenverdichten	25
– Refraktärmetalle	10	– Tränken	25
– Verbundwerkstoffe	10	– Imprägnieren	25
– Magnetwerkstoffe	10	– Wärmebehandlung	26
– Spezielle Hochleistungslegierungen	10	– Randschichthärten	26
Pulverherstellung	11	– Dampfbehandlung	26
– Festphasenreduktion	11	– Bläuen	26
– Elektrolyse	11	– Galvanische Beschichtung	26
– Verdüsung	11	– Beschichten	27
– Mechanisches Zerkleinern	13	– Mechanische Bearbeitung	27
– Chemische Verfahren	13	– Entgraten	27
– Pulvereigenschaften	13	Erzeugnisse und Anwendungen	27
Herstellung von Sinterformteilen	14	– Poröse Lager	27
– Mischen	14	– Porenfreie Lager	28
– Pressen	15	– Filter	28
– Gestaltung der Werkzeuge	15	– Reibwerkstoffe	29
– Werkzeuge	17	– Mechanische Präzisionsteile	29
– Warmpressen	17	– Präzisionsteile aus Sinterstahl	29
– Heißpressen (Drucksintern)	17	– Nichteisenformteile	32
Andere Formgebungsverfahren der Pulvermetallurgie	17	– Bronze	32
– Metallpulverspritzgießen (Metal Injection Moulding - MIM)	17	– Aluminium	32
– Isostatisches Pressen	19	– Sinterschmiedeteile	32
– Sinter-HIP	19	– Verfahren	32
– Ceracon-Prozess	20	– Vorteile	32
– Hochgeschwindigkeitspressen (HVC)	20	– Einschränkungen	32
– Rapid Manufacturing	20	– Hartmetalle und andere Hartstoffe	34
Sintern	21	– Sinterwerkstoffe für elektrische und magnetische Anwendungen	35
– Schutzgasatmosphären	22	– Elektrische Anwendungen	35
– Sinterhärten	22	– Magnetische Anwendungen	35
– Vakuumsintern	23	– Hartmagnetische Werkstoffe	36
– Maßänderungen beim Sintern	23	Pulverwalzen	36
– Flüssigphasensintern	24	Andere Produkte der Pulvermetallurgie	37
– Sintern in der α -Phase	24	Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (MMC)	37
		Literatur	39

PULVERMETALLURGIE

VERFAHREN UND PRODUKTE

8



Die Pulvermetallurgie wird seit ca. 1920 genutzt, um eine große Vielfalt an Strukturbauteilen, selbstschmierenden Lagern und Zerspanungswerkzeugen herzustellen. Diese Broschüre erläutert den PM-Prozess und beschreibt die neuesten Entwicklungen in der Produktionstechnologie und bei PM-Anwendungen.



Unter Pulvermetallurgie (PM) werden in dieser Publikation die Erzeugung von Metallpulvern und die Herstellung von Produkten aus solchen Pulvern über den als Sintern bekannten Prozess verstanden. In vielen Fällen werden die betreffenden technischen Bauteile direkt über diese Prozessroute hergestellt, z.B. jene, die im Folgenden abwechselnd als Formteile, Sinterteile oder PM-Bauteile bezeichnet werden. Auch herkömmlich über die Schmelzmetallurgie erhaltene Erzeugnisse, denen großes wirtschaftliches Potential zukommt, können aus Pulvern hergestellt werden, wovon eine Reihe erst unlängst erschienener, wissenschaftlich sehr interessanter Veröffentlichungen zeugt.

Der PM-Prozess umfasst das Pressen des Pulvers, normalerweise in einem Werkzeug, um einen sicher handhabbaren Pressling mit ausreichendem Zusammenhalt herzustellen, anschließend das Aufheizen des Presskörpers, üblicherweise in einer Schutzgasatmosphäre bis zu einer Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes der Hauptkomponente, wobei sich die einzelnen Pulverteilchen miteinander verbinden und dadurch eine für die spätere Anwendung ausreichende Festigkeit des Materials ausgebildet wird. Dieser Wärmebehandlungsschritt wird üblicherweise als Sintern bezeichnet.

DER PROZESS

Grundsätzlich besteht die Prozessabfolge für die Herstellung von PM-Bauteilen im:

(1) Mischen eines Pulvers oder mehrerer Pulver mit einem geeigneten Presshilfsmittel (nass oder trocken).

(2) Einfüllen der Mischung in ein Presswerkzeug, in dem Druck auf das Pulver einwirkt. Dabei entsteht ein sogenannter Pressling, der lediglich einen ausreichenden Zusammenhalt aufweisen muss, um ihn sicher handhaben und in den nächstfolgenden Arbeitsgang überführen zu können. Der Presskörper wird auch als „Grünling“ bezeichnet, was bedeutet, dass er noch ungesintert ist. Davon abgeleitet, werden die Begriffe „Gründichte“ und „Grünfestigkeit“ verwendet.

(3) Aufheizen des Presskörpers, üblicherweise in einer Schutzgasatmosphäre bis zu einer Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes der Hauptkomponente, wobei sich die einzelnen Pulverteilchen miteinander verbinden und dadurch eine für die spätere Anwendung ausreichende Festigkeit des Materials ausgebildet wird. Dieser Prozess wird als „Sintern“ bezeichnet, daraus abgeleitet der Begriff „Sinterbauteil“. In speziellen Fällen kann eine Zusatzkomponente bei Sintertemperatur auch schmelzen, was als „Flüssigphasensintern“ bezeichnet wird. Um dabei die Formbeständigkeit des Bauteils zu gewährleisten, muss der Anteil an flüssiger Phase begrenzt werden.

In Sonderfällen werden die Schritte (2) und (3) miteinander kombiniert, d.h. es wird bei erhöhter Temperatur gepresst, bezeichnet als „Heißpressen“ bzw. „Drucksintern“.

In einer speziellen Variante dieses Prozesses für die Herstellung von weichmagnetischen Verbundwerkstoffen (Soft Magnetic Composites, SMC) wird die Erwärmung des Presskörpers lediglich für die Aushärtung eines die Pulverteilchen voneinander isolierenden Polymers und nicht für das Sintern der metallischen Teilchen genutzt.

Häufig wird der gesinterte Körper noch zusätzlichen Nachbehandlungsschritten unterzogen, wie Nachpressen, Beschichten usw. Darüber wird an anderer Stelle ausführlicher berichtet.

In anderen Spezialfällen, z.B. bei der Herstellung von Filterelementen aus kugeligem Bronzepulver,

wird kein Druck aufgebracht, sondern das Pulver in eine passend gestaltete Form gefüllt, in der es dann gesintert wird. Man spricht vom Sintern einer Pulverschüttung.

WARUM WERDEN BAUTEILE AUS PULVER HERGESTELLT?

Für die Verwendung pulvermetallurgisch hergestellter Produkte gibt es zwei Gründe:

- (1) Kosteneinsparung im Vergleich mit alternativen Prozessen oder
- (2) besondere Eigenschaften, die nur durch die Pulvermetallurgie erreichbar sind.

Der erstgenannte Grund ist die treibende Kraft für die Produktion von:

Sinterformteilen (Genauteilen)

Hinsichtlich der Tonnage ist dies die mit Abstand bedeutendste Produktgruppe.

Den größten Anteil haben die Bauteile auf Eisenbasis, in beträchtlichen Mengen werden aber auch Kupfer-, Bronze-, Messing- und Aluminiumteile und in gewissem Umfang auch solche aus selteneren Metallen, wie Beryllium und Titan, hergestellt. Generell weisen PM-Bauteile deutlich höhere Genauigkeiten als Schmiedestücke auf. Der Hauptgrund für ihren Einsatz ist jedoch zumeist die erzielbare Kosteneinsparung. Im letzten Jahrzehnt haben allerdings Entwicklungen stattgefunden, die eine Revision der herkömmlichen Ansichten erforderlich machen. Inzwischen ist es möglich, gesinterte Teile mit gleichen oder sogar besseren Eigenschaften als über traditionelle Wege erreichbar herzustellen. Einige dieser Entwicklungen gingen direkt in Werkstoffsysteme ein, andere führten zu Modifikationen der Produktionsprozesse beim Pressen der Pulver (z.B. Warmpressen, Kaltisostatisches Hochdruckpressen, Hochgeschwindigkeitsverdichtung), beim Sintern (z.B. aktiviertes Sintern, Sintern in der α -Phase) oder beim Nachverdichten (wie Pulverschmieden, Oberflächenverdichten). Auf die einzelnen Entwicklungen wird detaillierter in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Für den zweiten Grund, die Einstellung besonderen Eigenschaften, gibt es eine Vielzahl von Beispielen:

Poröse Werkstoffe

Metalle weisen, je nach Herstellungsweg, meist eine gewisse Porigkeit auf, gesinterte Metalle sogar in stärkerem Maße als andere. Hier geht es jedoch um die Herstellung von Teilen mit hoher, genau kontrollierter Porosität, die eingestellt wird, um eine bestimmte nützliche Wirkung zu erzielen. Die Haupterzeugnisse dieser Gruppe von Werkstoffen sind Filter und ölgetränkte Lager, die oft auch als selbstschmierende Lager bezeichnet werden, die zu den wichtigsten PM-Produkten gehören und in einem späteren Abschnitt behandelt werden. Die folgenden Erzeugnisse können nicht ohne weiteres oder zufriedenstellend durch alternative Prozesse hergestellt werden:

Refraktärmetalle

haben sehr hohe Schmelzpunkte, so z.B. Wolfram, Molybdän, Niob, Tantal und Rhenium. Sie sind sehr schwer durch Schmelzen und Gießen herzustellen und häufig auch sehr spröde im gegossenen Zustand. Ein gesintertes Formkörper dagegen kann bei einer entsprechend hohen Temperatur mechanisch verformt werden. Es bildet sich dabei ein Gefüge aus, das Vorzugsorientierungen aufweist und dem nun dichten Material eine hinreichende Duktilität selbst bei Raumtemperatur verleiht.

Verbundwerkstoffe

Diese führen zwei oder mehrere Metalle, die selbst im flüssigen Zustand nicht ineinander löslich sind, oder Mischungen von Metallen mit nichtmetallischen Substanzen, wie Oxide oder andere Refraktärwerkstoffe, zusammen. Beispiele sind:

(a) Elektrische Kontaktwerkstoffe (Kupfer/Wolfram, Silber/Cadmiumoxid).

(b) Hartmetalle für Schneidwerkzeuge und Verschleißteile (z.B. Drahtziehvorrichtungen und Werkzeuge für das Warmumformen von Metallen).

Wolframcarbid mit Cobalt als Bindemetall war der erste Vertreter in dieser Materialklasse, der immer noch den größten Produktionsanteil ausmacht. Aber auch andere Carbide, Nitride, Carbonitride und in Sonderfällen auch Boride werden in zunehmender Menge eingesetzt. Für das relativ seltene und teure Cobalt wird ebenfalls nach Substitutionslösungen gesucht.

Dafür kommen Ni, Ni-Co, Ni-Cr, Fe-Co, Fe-Ni-Co, Nickelbasis-Superlegierungen und hochlegierte Stähle in Frage.

(c) Reibwerkstoffe für Brems- und Kupplungsbeläge, in denen abrasive und weitere nichtmetallische Komponenten in eine Matrix aus Kupfer oder anderen Legierungen eingebettet sind.

(d) Diamantwerkzeuge, insbesondere Schleifscheiben, in denen kleine Diamanten gleichmäßig in einer metallischen Matrix verteilt sind.

(e) In den letzten Jahren wurden verschiedene Werkstoffe, die fein verteilte nichtmetallische Phasen enthalten, entwickelt und eingesetzt. Diese dispersionsverfestigten Werkstoffe (bezeichnet auch als ODS-Werkstoff, wenn die verstärkenden Partikel Oxide sind) haben besonders bei hohen Temperaturen eine höhere Festigkeit als gegossene oder geschmiedete Metalle gleicher Grundzusammensetzung.

(f) Weichmagnetische Pulververbundwerkstoffe (Soft Magnetic Composites - SMC), bestehend aus Eisenpulverpartikeln, die voneinander durch einen ausgehärteten Kunstharzbinder isoliert sind. Es ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich, diese Verbundwerkstoffe anders als auf pulvermetallurgischem Wege herzustellen.

Magnetwerkstoffe

Wirtschaftliche und technische Vorteile werden auch bei der Herstellung von Bauteilen für magnetische Anwendungen erzielt.

Spezielle Hochleistungslegierungen

Schnellarbeitsstähle und Superlegierungen auf Ni- und/oder Co-Basis können über PM-Prozesse hergestellt werden und führen dabei zu einem Material, das bessere Eigenschaften als durch Gießen und Schmieden erreichbar aufweist.

Üblicherweise wird dafür das Pulver zu einem Block oder Knüppel kompaktiert, der dann durch Schmieden oder Strangpressen umgeformt wird. Die anschließende Formgebung geschieht in traditioneller Weise. Die Vorteile der PM-Route sind die höhere Ausnutzung des eingesetzten Materials und ein feineres, homogeneres Gefüge, das zu besseren mechanischen Eigenschaften sowie im Fall von Schneidwerkzeugen und Verschleißteilen zu längeren Standzeiten führt.

Der PM-Prozess gestattete auch die Entwicklung von prinzipiell neuen Werkstoffarten, die aus Pulvern mit mikrokristalliner oder sogar amorpher (glasartiger) Struktur hergestellt werden. Die Pulverteilchen hierfür entstehen durch sehr rasches Erstarren und Abkühlen geschmolzener, feiner Metalltröpfchen. Das dichte Endprodukt zeichnet

sich durch sehr hohe Festigkeit, Duktilität und thermische Stabilität aus.

PULVERHERSTELLUNG

Es gibt viele Wege, Metalle in Pulverform herzustellen:

- *Mechanisches Zerkleinern von festem Metall*
- *Ausscheiden aus Salzlösungen*
- *Thermische Zersetzung einer chemischen Verbindung*
- *Reduktion einer chemischen Verbindung, meist des Oxides, in fester Phase*
- *Elektrolytisches Abscheiden*
- *Verdüsen von flüssigem Metall*

Die drei letztgenannten Verfahren liefern den Großteil der in der Praxis verwendeten Pulver.

Festphasenreduktion

Dies war lange Zeit die meistgenutzte Methode zur Herstellung von Eisenpulvern. Das gereinigte Eisenerz wird zerkleinert, mit Kohlenstoff gemischt und anschließend durch einen kontinuierlich arbeitenden Ofen geschickt. Dort findet die Reaktion statt, die einen schwammartigen Eisenkuchen ergibt, der dann weiter durch Mahlen, Abtrennen nichtmetallischer Verunreinigungen und Sieben zum Pulver aufbereitet wird. Da der Prozess keine Raffination beinhaltet, hängt die Reinheit des Pulvers von der des Ausgangsmaterials ab. Die unregelmäßig geformten, schwammartigen Pulverteilchen sind weich, leicht verpressbar und führen zu einem Presskörper mit hoher Grünfestigkeit.

Hochschmelzende Metalle werden üblicherweise durch Wasserstoffreduktion ihrer Oxide hergestellt. Der gleiche Weg kann für Kupfer begangen werden.

Es gibt auch einige Betriebe, die Eisenpulver durch Reduktion von Eisenoxid (Walzzunder) mit Hilfe von Wasserstoff oder kohlenstoffhaltigem Material, wie Koks, herstellen.

Eine Verfahrensvariante für die Herstellung gut verpressbaren Eisenpulvers sieht auch die Entkohlung eines vorher granulierten und pulverisierten hochkohlenstoffhaltigen Eisens vor.

Elektrolyse

Bei Auswahl geeigneter Bedingungen – Art und Konzentration des Elektrolyten, Temperatur, Stromdichte usw. – können viele Metalle in einem schwammartigen oder pulverförmigen Zustand abgeschieden werden.

Eine aufwändige Nachbehandlung durch Waschen, Trocknen, Reduzieren, Glühen und Zerkleinern kann allerdings erforderlich sein.

Kupfer ist das wichtigste Metall, das auf diesem Weg produziert wird, aber auch Chrom und Mangan werden durch Elektrolyse hergestellt. In diesen Fällen bildet sich jedoch eine dichte und üblicherweise spröde Ablagerung, die erst zum Pulver zerkleinert werden muss. Verschärfte Umweltgesetze schränken die Produktion von Elektrolytkupfer inzwischen auf Regionen ein, in denen diese Bedingungen nicht so streng sind. Trotzdem wird diese Pulverart durch die großen Kupferpulver-Anbieter weiterhin in großem Umfang vertrieben. Elektrolyseisenpulver wurde früher ebenfalls in erheblichen Mengen produziert, ist aber nun größtenteils durch Pulver aus kostengünstigeren Prozessrouten ersetzt worden. Eine sehr hohe Reinheit und hohe Pressdichten sind die herausragenden Merkmale der Elektrolytpulver.

Verdüsung

In diesem Prozess wird geschmolzenes Metall in kleine Tröpfchen zerteilt und rasch erstarrt, bevor die Schmelztröpfchen in Kontakt miteinander oder mit einer festen Oberfläche kommen.

Das Prinzip des Verfahrens beruht auf der Zerteilung eines dünnen, flüssigen Metallstrahls durch einen mit hoher Geschwindigkeit auftretenden Gas- oder Flüssigkeitsstrom. Luft, Stick-



Bild 1: Metallpulver mit Beispielen von Bauteilen (EPMA)

stoff und Argon sind die meistgenutzten Gase, als Flüssigkeit wird vor allem Wasser eingesetzt.

Durch Variieren von Prozessparametern – Form und Anordnung der Düsen, Druck und Mengenstrom des Verdünnungsmediums, Dicke des flüssigen Metallstrahls usw. – kann die Teilchengröße in einem weiten Bereich eingestellt werden. Die Partikelform wird in erster Linie durch die Erstarrungsgeschwindigkeit bestimmt und variiert von kugelförmig, wenn ein Gas mit einer niedrigen Wärmekapazität verwendet wird, bis stark unregelmäßig im Fall des Einsatzes von Wasser. Prinzipiell kann dieses Verfahren für alle schmelzbaren Metalle verwendet werden, wird aber industriell vorrangig für Eisen, Kupfer, Werkzeugstähle, Stahllegierungen, Messing, Bronze und niedrig schmelzende Metalle, wie Aluminium, Zinn, Blei, Zink und Cadmium, eingesetzt.

Die oxidationsempfindlicheren Metalle (z.B. chromhaltige Legierungen) werden in zunehmendem Maße durch Inertgasverdünnung (hauptsächlich mit Argon) hergestellt.

Auch andere Verfahren der Schmelzzerteilung finden zunehmend Anwendung, so z.B. die Zentrifugalverdünnung, bei der Schmelztröpfchen von einer rotierenden Quelle weggeschleudert werden. Grundsätzlich gibt es zwei Varianten der Zentrifugalzerstäubung:

(1) Ein Tiegel mit dem geschmolzenen Metall rotiert um seine vertikale Achse mit einer ausreichenden Geschwindigkeit, um Schmelztröpfchen herauszuschleudern, oder ein Metallstrahl trifft auf eine schnell rotierende Scheibe oder einen Kegel.

(2) Ein Metallstab rotiert mit hoher Umdrehungsgeschwindigkeit, wobei sein freies Ende nach und nach, z.B. durch einen Elektronenstrahl

oder einen Lichtbogen, abgeschmolzen wird. Das letztgenannte Verfahren wird als „Rotating Electrode Process (REP)“ bezeichnet. Der Metallstab kann dabei entweder um eine horizontale oder um eine vertikale Achse rotieren.

Von besonderem Vorteil ist bei diesen Verfahren, dass sie in einem abgeschlossenen Behälter und unter kontrollierter Atmosphäre (sogar unter Vakuum) durchgeführt werden können, wodurch man ein sehr reines Pulver sogar von reaktionsfreudigen Metallen erhält.

Da bei dem REP-Verfahren der Kontakt mit keramischem Tiegelmaterial vermieden wird, kann der Anteil nichtmetallischer Einschlüsse im Pulver und in den daraus hergestellten Bauteilen sehr gering gehalten werden.

In den letzten Jahren wurde die Close-coupled Gasverdünnung für die Herstellung von feinen Pulvern mit Anwendungsbereichen u.a. im Metallpulverspritzgießen (MIM, s.S. 17) intensiv weiterentwickelt. Bei der Close-coupled Gasverdünnung sind der Schmelzauslauf und der Düsenkopf derartig angeordnet, dass der flüssige Metallstrahl mit dem Verdünnungsgas unmittelbar unterhalb der Düse nach einer nur geringen oder ganz fehlenden Freifallhöhe zusammentrifft.

Die Verdünnung ist vor allem für die Produktion von Legierungspulvern nützlich, da die zugesetzten Metalle bereits im geschmolzenen Zustand in der Legierung gleichmäßig verteilt werden. Jedes Pulverteilchen hat deshalb die gleiche Zusammensetzung.

Weiterhin wird dieses Verfahren genutzt, um Verbundwerkstoffe herzustellen, wie z.B. Kupfer-Blei. Das Blei, obwohl im flüssigen Zustand löslich, wird während der Erstarrung ausgeschieden. Folglich tritt beim Gießen einer solchen



Bild 2: Wasserverdünnung (Hoeganaes Corporation)

Legierung eine beträchtliche Seigerung von Blei auf. Wird die Schmelze dagegen verdüst, erhält man Kupferpulverteilchen, in denen sehr fein und gleichmäßig verteilte Bleieinschlüsse vorliegen.

Mechanisches Zerkleinern

Spröde Materialien, wie z.B. intermetallische Verbindungen, Ferrolegierungen, Eisen-Chrom-Legierungen oder Eisen-Silicium-Legierungen, werden in Kugelmøhlen mechanisch zu Pulvern zerkleinert. Sehr feine Pulver können durch den sogenannten Coldstream-Prozess erzeugt werden. Hierbei wird granulares Ausgangsmaterial, wie z.B. grob verdüstes Pulver, kontinuierlich in einen Gasstrom gegeben, der unter Druck durch eine Venturidüse strömt und dabei durch adiabatische Expansion abkühlt. Der mitgeführte Feststoff versprödet durch die Abkühlung, trifft auf eine Prallplatte und wird dabei zertrümmert.

Chemische Verfahren

Die thermische Zersetzung von chemischen Verbindungen wird in einigen Fällen genutzt, beispielsweise bei Nickelcarbonyl. Der Carbonylprozess wurde ursprünglich entwickelt, um Reinstnickel herzustellen. Rohnickel wird unter Druck mit Kohlenmonoxid zur Reaktion gebracht, wobei gasförmiges Nickelcarbonyl entsteht. Bei weiterer Temperaturerhöhung oder Druckreduktion zerfällt es aber wieder zu elementarem Nickel und Kohlenmonoxid.

Der gleiche Prozess findet auch für Eisen Anwendung und Carbonyl-Eisenpulver wird in geringen Mengen dort eingesetzt, wo besonders hohe Reinheit gefordert wird.

Der Carbonylprozess erlebte jüngst einen Aufschwung durch den steigenden Bedarf an Feinstpulvern für den Metallpulverspritzguss. Typischerweise liegen die Teilchengrößen des Carbonyleisenpulvers im Bereich 1 bis 5µm. Wie auch bei Nickel können die Pulverteilchengrößen aber nach Bedarf angepasst werden.

Ein weiteres Beispiel der thermischen Zersetzung ist die Herstellung von Platinpulver, das aus einem durch die thermische Zersetzung von Platinammoniumchlorid erhaltenen Metallschwamm gewonnen wird. Im Sherritt-Gordon-Prozess wird Nickelpulver erzeugt, indem ein Nickelsalz in wässriger Lösung durch Wasserstoff unter Druck reduziert wird.

Die chemische Ausfällung von Metallen aus Salzlösungen wird in anderen Fällen genutzt, z.B. bei der Herstellung von Silberpulver durch das Hinzufügen eines Reduktionsmittels zu einer Silbernitratlösung. Dies ist im Grunde der gleiche Prozess wie in der Bilderzeugung bei der

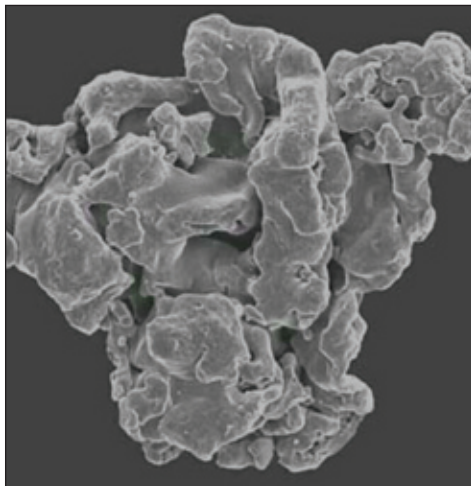


Bild 3: Schwammeisenpulver NC 100.24 (Höganäs AB)

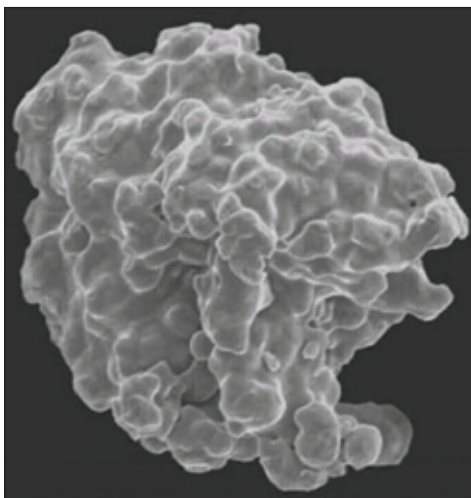


Bild 4: Verdüstes Eisenpulver ASC 100.29 (Höganäs AB)

Schwarz-Weiß-Fotografie. Cobaltpulver werden ebenfalls hergestellt, indem Cobaltcarbonatpulver reduziert wird, das über die chemische Ausscheidungsreaktion mittels Kohlendioxid, ausgehend von Cobaltaminosulfatlösung, gewonnen wird.

Pulvereigenschaften

Die weitere Verarbeitung und die schließlich am Sinterkörper erzielbaren Resultate werden

durch die folgenden Eigenschaften der Pulver beeinflusst:

- Teilchengröße
- Teilchengrößenverteilung
- Teilchenform
- Struktur und Gefüge
- Oberflächenbeschaffenheit

Ein sehr wichtiger Parameter ist die Schüttdichte des Pulvers, d.h. die Pulvermasse in einem definierten Volumen, da sie stark die beim Pressen erreichbare Festigkeit des Presskörpers beeinflusst. Die Schüttdichte ist eine Funktion der Teilchenform und der inneren Porosität der Pulverteilchen.

Die Wahl der Pulvercharakteristika erfordert normalerweise Kompromisse, da die meisten Einflussfaktoren von gegensätzlicher Wirkung sind. Je unregelmäßiger die Form der Pulverteilchen und je höher ihre innere Porosität ausfallen, umso geringer wird die Füllichte und umso größer ist die Volumenabnahme beim Pressen, was zu stärkeren Kaltverschweißungen zwischen den Pulverteilchen und somit zu höherer Grünfestigkeit führt. Die ausgedehnten Kontaktflächen bewirken außerdem effektivere Sintervorgänge.

Andererseits bedingt die für die angestrebte Gründichte notwendige größere Volumenabnahme aber höhere Pressdrücke und damit entsprechend größere Pressen und höher belastbare Presswerkzeuge.

Um ein Pulver leicht und möglichst dicht in das Presswerkzeug einzubringen, ist eine breite Teilchengrößenverteilung vorteilhaft, da die Zwischenräume zwischen großen Teilchen effektiv von kleineren aufgefüllt werden können.

Geringere Teilchengrößen führen zu kleineren Poren, die während des Sinterns leichter geschlossen werden können. Ein höherer Anteil feiner Partikel verschlechtert aber auch die Fließeigenschaften des Pulvers.

Geringe Teilchengrößen sind für den Metallpulverspritzguss in jedem Fall erforderlich (s.S. 17). Die zunehmende Verbreitung, die dieses Verfahren seit den 80er Jahren erfährt, stimulierte in starkem Maße zunächst die Verwendung von Carbonyleisen- und -nickelpulver und in der Folge in noch bedeutenderem Umfang die Nutzung von feinen gasverdünsten Pulvern (Close-coupled Verdüsung).

Von entscheidender Bedeutung ist die Reinheit des Pulvers. Der Grad an Verunreinigung, der noch tolerierbar ist, hängt stark davon ab, welche Komponenten vorkommen und in welcher

Bindungsform sie vorliegen.

So führt gelöster Kohlenstoff im Eisen zu einer Härtung der Matrix, deshalb sind für die Verdichtung höhere Pressdrücke notwendig. Freier Kohlenstoff dagegen ist häufig von Vorteil, da er als Schmiermittel während des Pressens wirkt.

Die Metallpulverteilchen sind meist von einer dünnen Oxidschicht umschlossen, die aber den Prozess nicht wesentlich beeinflusst, da sie beim Pressvorgang aufreißt und dann saubere und aktive Metalloberflächen freigibt, die leicht kaltverschweißbar sind. Die Reduktion dieser Oxide in der eingestellten Sinteratmosphäre ist jedoch wichtig für das vollständige Versintern und die maximale Festigkeit.

Stabile Oxidschichten oder oxidische Einschlüsse, wie SiO_2 und Al_2O_3 , bereiten ernsthaftere Probleme, weil sie grundsätzlich abrasiv wirken und einen erhöhten Werkzeugverschleiß verursachen. Darüber hinaus gelingt es nicht, sie während des Sinterns zu reduzieren. Ihr Verbleib im Sinterkörper hat in der Regel ungünstige Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, besonders auf die Schlagzähigkeit. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn hochfeste, hochdichte Bauteile angestrebt werden, wie etwa beim Pulverschmieden.

HERSTELLUNG VON SINTERFORMTEILEN

Die grundsätzliche Abfolge von Verfahrensschritten der pulvermetallurgischen Fertigung ist schematisch in Bild 5 dargestellt. Die Ausgangspulver werden zusammen mit einem Schmiermittel gemischt bis eine homogene Mischung erhalten wird. Diese wird in ein Presswerkzeug gefüllt, darin unter Druck verdichtet und anschließend der Presskörper gesintert. Eine Ausnahme bildet die Herstellung von Filterfritten aus kugeligem Bronzepulver, wo kein Druck benötigt wird. Das Pulver wird einfach in eine entsprechende Form geschüttet und darin versintert.

Mischen

Das Ziel ist, eine homogene Mischung zu erhalten und das Schmiermittel für den Pressvorgang einzubringen. Gebräuchliche Schmierstoffe sind Stearinsäure, Stearin, Metallstearate (bes. Zinkstearat) und zunehmend andere wachsartige organische Verbindungen. Die Hauptaufgabe der Schmiermittel ist es, die Reibung zwischen dem Pulver und den Presswerkzeuoberflächen - Matrizenwand, Dorne usw. - an denen die

Pulver während der Verdichtung entlanggleiten müssen, zu vermindern, sodass annähernd die gleiche Dichte an der Ober- und Unterseite des Presslings erreicht wird. Gleichermäßen wichtig ist, dass die Verringerung der Reibung das Ausstoßen des Presslings erleichtert und so das Risiko von Rissen verringert wird.

Man nahm an, dass eine zusätzlich Funktion des Presshilfsmittels darin besteht, das Abgleiten der Pulvertelchen aneinander zu erleichtern. Es scheint aber zweifelhaft, ob dieser Faktor wirklich signifikant ist - gute Presskörper erhält man auch ohne jeglichen Zusatz von Presshilfsmitteln, beispielsweise durch Schmierung der Presswerkzeugwände oder beim Isostatischen Pressen. Sorgfalt bei der Auswahl des Presshilfsmittels ist erforderlich, da sonst nachteilige Auswirkungen auf die Grünfestigkeit wie auch auf die Festigkeit des gesinterten Teils eintreten können, besonders wenn Rückstände nach der Zersetzung der organischen Bestandteile verbleiben.

Ein Übermischen sollte vermieden werden, da dadurch die Schüttdichte der Mischung ansteigt. Zudem wird durch ein Übermischen die Grünfestigkeit der Presskörper herabgesetzt, vermutlich durch die vollständige Beschichtung der gesamten Partikeloberfläche, wodurch der Anteil an Metall-Metall-Kontakten, von dem die Grünfestigkeit abhängt, verringert wird.

Die Fließeigenschaften werden ebenfalls beeinflusst. Gute Fließeigenschaften des Pulvers sind für den nachfolgenden Verarbeitungsschritt, d.h. das Füllen der Pressmatrize, unverzichtbar. Im speziellen Fall der Hartmetalle erfolgt der Mischvorgang in Kugelmöhlen oder Attritoren, um die Carbidteilchen mit dem Bindermetall (Cobalt) regelrecht zu beschichten. Da aber die feinen Pulver schlecht fließen, werden sie nachträglich zu größeren Agglomeraten granuliert.

Pressen

Die fertig gemischten Pulver werden in Pressmatrizen aus verschleißfestem Stahl oder Hartmetall bei Pressdrücken von 150-900 MPa in Form gepresst. In diesem Prozessschritt erhalten die Presslinge ihre Formstabilität aufgrund von Kaltverschweißungen der Pulvertelchen untereinander. Die Presskörper müssen ausreichend stabil sein für das Auswerfen aus dem Werkzeug und die Handhabung vor dem Sintern. Generell ist das Pressen ein kritischer Schritt, denn die Endgeometrie und die mechanischen Eigenschaften werden maßgeblich durch die Höhe und die Gleichmäßigkeit der Pressdichte bestimmt. Pulver unter Druck verhalten sich nicht wie Flüssigkeiten, sodass sich der Druck nicht gleichmä-

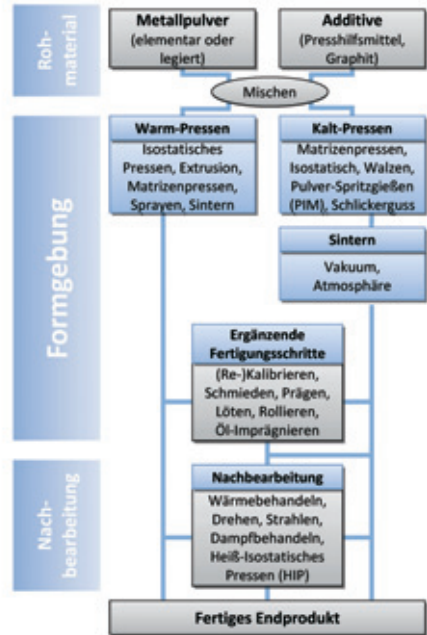


Bild 5: Darstellung der pulvermetallurgischen Prozessroute

ßig verteilt und kaum lateraler Materialfluss in der Matrize stattfindet. Ob die gewünschte Dichte erreicht wird, hängt folglich zu einem großen Teil von der Gestaltung des Presswerkzeuges ab.

Der höchstzulässige Pressdruck wird dadurch bestimmt, dass ein Bruch der Presswerkzeuge zu vermeiden ist. Bei komplexen Werkzeuggeometrien mit unterschiedlichen Presshöhen ist es wegen der dünnen, zerbrechlichen Stempel im Werkzeugaufbau erforderlich, den Pressdruck auf etwa 600 MPa zu begrenzen. Bei einfachen Bauteilgeometrien, bei denen keine dünnen Zusatzstempel benötigt werden, sind dagegen Pressdrücke von 1000 MPa und darüber anwendbar. Dieses Hochdruck-Kaltverdichten ermöglicht Bauteile mit höherer Dichte und damit besseren Eigenschaften, die Anwendungen für Anlasserzahnrad, Synchronringe und Nocken von Nockenwellen eröffnen.

Gestaltung der Werkzeuge

Wegen des geringen lateralen Materialflusses und der Notwendigkeit, die Grünteile in Pressrichtung ausstoßen zu können, müssen folgende Aspekte bei der Werkzeugkonstruktion beachtet werden:

(1) Höhen-Breiten-Verhältnis

Der für die Verdichtung wirksame Pressdruck und damit die Gründichte nehmen wegen der Reibung an den Werkzeugwänden über die Höhe der Presssteile ab. Eine gleichmäßigere Druckverteilung wird zwar durch doppelseitiges Pressen erreicht, ein Bereich mit geringerer Dichte in der Mitte der Presslinge ist aber unvermeidbar. Ein Verhältnis von Höhe zu Breite von mehr als 3:1 ist deshalb nicht zu empfehlen.

(2) Quer zur Pressrichtung liegende Hinterschnidungen

Seitliche Nuten und Bohrungen können in Pressteilen nicht dargestellt werden, da dadurch das Entformen unmöglich ist. Sie müssen deshalb nachträglich herausgearbeitet werden, obwohl bereits raffinierte, mitunter bewegliche Presswerkzeuganordnungen konstruiert und patentiert wurden, um diese Einschränkungen zu umgehen.

(3) Fasen erfordern scharfkantige Werkzeuge, die empfindlich und leicht zerbrechlich sind. Wenn es die Konstruktion zulässt, sollten angefasste Kanten der Bauteile in kleinen Ebenen enden.

(4) Schroffe Querschnittsänderungen sollten vermieden werden, denn sie führen zur Spannungskonzentration. Beim elastischen Auffedern des Presslings während des Entformens aus dem Werkzeug können die entstehenden Spannungen an diesen Stellen zur Rissbildung führen.

(5) In erster Näherung ist die Größe des herstellbaren Presssteils eine direkte Funktion der Presskraft der verfügbaren Presse. Die Formkomplexität des Bauteils und die Anzahl der erforderlichen bewegten Stempel beeinflussen aber zusätzlich die Gleichung. Dieselben Faktoren sind für die Produktivität von Bedeutung. Je einfacher das Bauteil ist, umso schneller kann gepresst werden. Bei solchen Formteilen ist 1 Teil je Sekunde mit mechanischen Pressen herstellbar. Hydraulische Pressen gestatten höhere Pressdrücke bis zu 50.000 kN (5.000t), wobei die Geschwindigkeit zwangsläufig geringer ist. 10 Teile je Minute ist eine durchaus repräsentative Geschwindigkeit bei vergleichsweise einfacher Bauteilgeometrie.

Es wurde bereits erläutert, dass aufgrund der zwischen den Pulverpartikeln und der Matrizenwand wirkenden Reibungskräfte der übertragene Pressdruck und somit die erzielte Dichte über die Länge des Bauteils abnimmt. Es ist offensichtlich, dass dieser Einfluss mit zunehmender Formteilgröße an Bedeutung gewinnt und somit ebenfalls die Größe wirtschaftlich herstellbarer Sinterteile begrenzt.

Die genannten Effekte werden durch verbesserte Schmierung und doppelseitige Verdichtung



Bild 6: Pulverpresse (Fette GmbH)

verringert und viele Pressen gestatten auch separate Bewegungen mehrerer Pressstempel oberhalb und unterhalb der Matrize. Ähnlich gute Ergebnisse können beim einseitigen Pressen gleichfalls erhalten werden, wenn mit einer Schwebematrize gearbeitet wird. Nach dem Pressvorgang kann man die Abwärtsbewegung der Matrize fortsetzen und dadurch das Werkzeug vom Bauteil abziehen statt es durch eine Aufwärtsbewegung des unteren Pressstempels auszustößen.

Da die Abhängigkeit der Gründichte vom Pressdruck einer hyperbolischen Beziehung entspricht, gibt es in der Praxis einen optimalen Druck, oberhalb dessen kaum noch weitere Verdichtung eintritt, dagegen der Werkzeugverschleiß deutlich zunimmt.

Ein weiterer, die erzielbare Dichte beschränkender Faktor ist die Anwesenheit des Presshilfsmittels. Obwohl üblicherweise nicht mehr als 1 Gew.-% zugesetzt wird, beträgt der Volumenanteil 5% oder mehr. Deshalb kann die Dichte des Presskörpers 95% nicht überschreiten, selbst wenn alle Poren eliminiert wurden. Bei Anwendung einer Matrizenwandschmierung und Einsatz von gleitmittelfreien Pulvermischungen tritt dieses Problem nicht auf. Die praktischen Schwierigkeiten beim Aufbringen des Gleitmittels vor jeder Matrizenbefüllung beschränken den Einsatz einer solchen Prozessvariante jedoch bislang auf wenige spezielle Fälle, bei denen die hohe Dichte zwingend gefordert wird.

Werkzeuge

Die Hauptbestandteile eines Werkzeugsatzes sind die Matrize, in die das Pulver eingefüllt wird, und die Pressstempel, die den Pressdruck übertragen. Wenn, wie es häufig der Fall ist, das Bauteil in Längsrichtung verlaufende Bohrungen haben soll, werden diese durch Dorne gebildet, die vor der Pulverbefüllung in der Matrize angeordnet werden. Mehrere, sich unabhängig voneinander bewegende Pressstempel werden verwendet, wenn das zu pressende Bauteil verschiedene Höhenniveaus hat. Die Matrize und die Dorne bilden die Kontur des Formteils parallel zur Pressrichtung und müssen natürlich frei von Hinterschneidungen und Nuten quer zur Pressrichtung sein, da es sonst nicht möglich wäre, das Formteil aus der Matrize auszustoßen.

Für die Werkzeuge werden gehärtete Werkzeugstähle oder Hartmetalle eingesetzt. Die Verwendung von teureren Hartmetallen nimmt zu, da sie längere Standzeiten ermöglichen und die Kosten für Werkzeugwechsel, bedingt durch Produktionsausfall und Lohnkosten der Werkzeuginrichter, gesenkt werden können. PM-Schnellarbeitsstähle finden zunehmend Anwendung in diesem Bereich. Für Kleinserien können Werkzeuge aus normalen Stählen natürlich wirtschaftlicher sein.

Die Bedeutung genauer Bauteilmaße und einer hohen Oberflächenqualität bedarf keiner besonderen Betonung, wenn man berücksichtigt, dass der Einsatz von gesinterten Bauteilen hauptsächlich dadurch wirtschaftlich gerechtfertigt ist, dass die Herstellung hinsichtlich der Maßgenauigkeit und der Oberflächengüte so präzise erfolgt, dass eine Nachbearbeitung eingespart werden kann.

Die Werkzeugstandzeit ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der näher betrachtet werden muss. Die Lebensdauer hängt nicht nur von der zu verpressenden Materialart, der angestrebten Dichte, der verwendeten Schmiering und von dem tolerierbaren Werkzeugverschleiß ab, sondern auch von den Fähigkeiten des Werkzeuginrichters sowie von der Komplexität der Werkzeuge. Mit Stahlmatrizen können bis zu 200.000 Formteile gepresst werden, mit Hartmetallmatrizen sogar 1.000.000 Bauteile oder mehr.

Warmpressen

Das Warmpressen ist eine Variante des Pressverfahrens, die ein Vorheizen sowohl des zugeführten Pulvers als auch des Presswerkzeuges auf ungefähr 130°C einschließt. Dadurch kann die Gründichte um 0,1 bis 0,3 g/cm³ im Vergleich zum konventionellen Kaltpressen erhöht werden, was zu einer Verbesserung der mechanischen Ei-

genschaften um 10-20% führt. Mehrere Systeme für Pulver- und Werkzeugbeheizungen wurden entwickelt und werden von den Pressherstellern angeboten, auch zur Nachrüstung für vorhandene Pressen.

Einige hundert unterschiedliche Bauteile werden schon auf diese Art produziert. Viele davon sind schrägverzahnte Zahnräder für elektrische Handwerkzeuge, aber auch Automobilanwendungen, wie Kettenräder, Synchronringe und verschiedene Nabenbauteile, gehören dazu.

Heißpressen (Drucksintern)

Während die meisten Bauteile durch Pressen einer Pulvermischung bei Umgebungstemperatur und anschließendes Sintern hergestellt werden, nutzt man das Heißpressen nur in bestimmten Fällen. Metalle sind bei erhöhten Temperaturen weicher und es ist so möglich, sie ohne Druckerhöhung zu einer höheren Dichte zu verpressen. Eine weitere Sinterbehandlung ist zwar möglich, aber eher ungewöhnlich, da das Heißpressen bereits zu signifikant verbesserten Eigenschaften führt und eine zusätzliche Wärmebehandlung kaum weitere Verbesserungen bewirkt. Der breiten Verwendung dieses Prozesses stehen die vielfach höheren Kosten entgegen, es werden spezielle warmfeste Werkzeuge und unter Umständen auch eine Schutzgasatmosphäre benötigt. Darüber hinaus ist die Produktivität vergleichsweise niedrig. Trotzdem findet das Heißpressen in größerem Umfang Anwendung bei der Herstellung von speziellen Hartmetall- und Diamantwerkzeugen, die ohnehin zu den teuren Werkstoffen zählen.

ANDERE FORMGEBUNGS- VERFAHREN DER PULVER- METALLURGIE

Metallpulverspritzgießen (Metal Injection Moulding – MIM)

Die Herstellung von Grünkörpern durch Spritzgießen eines plastifizierten Pulverfeedstocks wurde in den 1970er Jahren zuerst für Keramik entwickelt und am Ende dieser Dekade auf metallische Pulver übertragen (Metal Injection Moulding).

Die Prozessabfolge ist eigentlich recht einfach. Das mit einem thermoplastischen Binder gemischte Metallpulver wird intensiv durchgearbeitet (unter Verwendung von Knetmaschinen oder Scherwalzenextrudern), um einen plastifizierten Feedstock zu erzeugen (gewöhnlich in

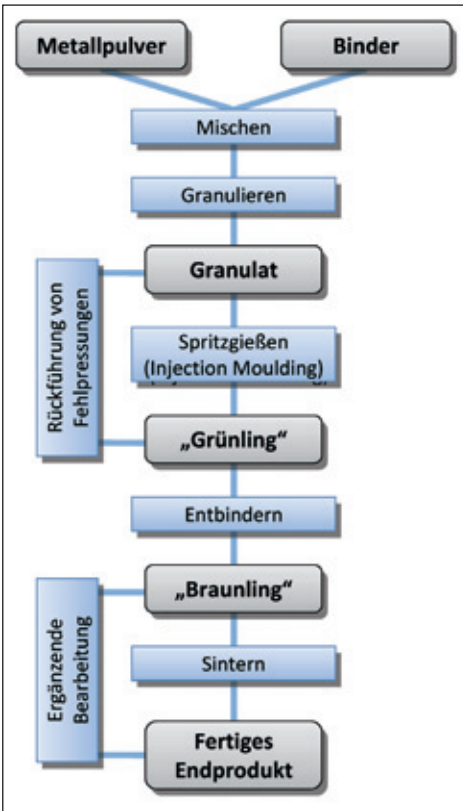


Bild 7: Prozessfolge beim Metallpulverspritzguss

Form von Granulat), der dann bei leicht erhöhter Temperatur in eine Form eingespritzt wird, ähnlich der Produktion von Kunststoffteilen. Tatsächlich wurden anfangs auch die gleichen Spritzgussmaschinen wie in der Kunststoffindustrie verwendet. Das Grünteil wird anschließend entformt, der Binder ausgetrieben und das Teil gesintert. Üblicherweise werden Dichten von mehr als 95 % der theoretischen Dichte erreicht, was zu Eigenschaften führt, die mit denen dichter Werkstoffe vergleichbar sind, wobei eine bemerkenswerte hohe Maßgenauigkeit der Bauteile erzielt wird.

Nach dieser Beschreibung könnte man einwenden, dass der Prozess sicher deutlich teurer als die traditionelle PM-Route ist. Dass er dennoch Anwendung findet, liegt an der Möglichkeit, Bauteile mit sehr komplexen Geometrien, die mit konventioneller Pulvermetallurgie überhaupt nicht darstellbar sind, fertigen zu können. Wegen der Formkompliziertheit würde auch die notwen-

dige spanende Fertigung sehr teuer sein.

Der Prozess beinhaltet einige spezielle Anforderungen. Eines der Geheimnisse für den Erfolg – trotz einer Vielzahl von Literatur zu diesem Thema gibt es noch Geheimnisse – ist die Rezeptur des Binders. Neben anderen notwendigen Eigenschaften ist es wichtig, dass dieser die Pulverteilchen gut benetzt, damit eine homogene Masse entsteht, und dass er ohne einen Bauteilverzug oder -zerstörung wieder entfernt werden kann. Seit der Einführung patentrechtlich geschützter Bindervarianten gab es eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten und heutzutage stehen viele unterschiedliche Rezepturen zur Verfügung.

Auch an die Metallpulver werden spezielle Forderungen gestellt. Um einen leicht spritzbaren Feedstock und eine gleichmäßige Pulververteilung zu erreichen, muss das Pulver, verglichen mit anderen PM-Verfahren, sehr fein sein. Die für die Herstellung niedriglegierter Stähle verwendeten Carbonylisen- und Nickelpulver bestehen aus sphärischen Partikeln mit einer Teilchengröße zwischen 2 und 10 μm . Hochlegierte Pulver, wie z.B. rostfreie Stähle (derzeit sehr verbreitet in der MIM-Produktion), sind entweder gas- oder wasserverdüst und haben Partikelgrößen kleiner 40 μm . Gasverdüste Pulver werden generell durch eine Close-coupled Verdüsung hergestellt, wie bereits in einem vorangegangenen Abschnitt ausgeführt wurde. Der Gehalt an organischem Binder liegt üblicherweise im Bereich von 50 Volumen-%. Die Verwendung feiner Metallpulver bietet einen weiteren wichtigen Vorteil, wegen ihrer großen spezifischen Oberfläche weisen sie eine erhöhte Sinteraktivität auf.

Das Entfernen des Binders, üblicherweise als Entbinderung bezeichnet, ist ein weiterer wesentlicher Prozessschritt. Anfangs wurden die Teile vorsichtig erwärmt, wobei der Binder verdampfte oder sich zersetzte (thermisches Entbindern). Dies war ein relativ langsamer Prozess, der in Abhängigkeit von den Bauteildicken einige Stunden bis Tage beanspruchen konnte. Aus diesem Grunde wurden alternative Entbinderungsverfahren entwickelt, die nun deutlich geringere Entbinderungszeiten ermöglichen. Ein Beispiel ist das patentierte Verfahren der katalytischen Entbinderung. Hierbei wird ein Polyacetat-Binder in Säuredampf-Umgebung (konzentrierte Salpeter- oder Oxalsäure) bei Temperaturen von etwa 120°C entfernt, die entstehenden Reaktionsprodukte werden in einer Erdgasflamme verbrannt. Gleichfalls zur Anwendung kommt die Lösungsmittel-Extraktion, bei der ein Teil des Binders bei Raumtemperatur in einem flüssigen



Bild 8: Beispiele von MIM-Teilen (EPMA)

Lösungsmittel löslich ist, so dass ein Netzwerk miteinander verbundener Poren im Formkörper entsteht (wodurch die anschließende thermische Entbinderung beschleunigt werden kann). Wasserlöslichen Bindersystemen wird aus Gründen des Umweltschutzes der Vorzug eingeräumt.

Wegen der relativ langsamen und dickenabhängigen Entbinderung hat sich das Metallpulverspritzgießen bislang vorrangig für Kleinteile durchgesetzt.

Das Sintern von MIM-Teilen ist vergleichbar mit dem von gepressten Formteilen, jedoch verursacht der hohe Binderanteil von ca. 50% einen sehr großen Sinterschwund. Um trotzdem hohe Genauigkeiten der Bauteilabmessungen zu erreichen, sind eine sehr homogene Mischung (Feedstock) und damit ein gleichmäßiges Schwinden im gesamten Bauteil erforderlich.

Da wirtschaftlich vorteilhaft hochfeste, formkomplizierte Teile in großen Serien aus einer breiten Werkstoffpalette hergestellt werden können, stellt das Verfahren eine gute Alternative zum Druckguss und zur Fertigung über mechanische Bearbeitung dar.

Nach einer Anlaufzeit, in der sich der Metallpulverspritzguss seine Akzeptanz bei den Konstrukteuren erst erobern musste, erzielt dieser Bereich seit über zehn Jahren jährliche Wachstumsraten von ca. 10%. Ähnliche Zuwachsraten werden auch für die absehbare Zukunft erwartet.

Isostatisches Pressen

Das Isostatische Pressen wird als Formgebungsverfahren zunehmend angewendet.

Beim Kaltisostatischen Pressen (Cold Isostatic Pressing – CIP) wird das Pulver in eine flexible Hülle, üblicherweise aus Polyurethan, gegeben. Beim Nasspressverfahren (Wet Bag) wird die gefüllte Hülle in eine Flüssigkeit (meist Wasser)

getaucht, über die ein hoher Druck aufgebracht wird. Somit wird das Pulver von allen Seiten gleichmäßig gepresst. Da zudem kein Presshilfsmittel erforderlich ist, werden hohe und gleichmäßige Dichten erreicht. Beim Trockenpressverfahren (Dry Bag) ist die elastische Form, die das Pulver aufnimmt, fest mit dem Druckgefäß verbunden. Der Pressdruck wird über diese elastische Hülle von der Flüssigkeit auf das Pulver übertragen, ohne dass im Arbeitsbereich Flüssigkeit sichtbar wird (daher „trocken“).

Viele der Geometriebeschränkungen des uniaxialen Matrizenpressens entfallen bei diesem Verfahren. Lange, dünnwandige Zylinder und Teile mit Hinterschnitten stellen kein Problem dar. Die zunehmende Automatisierung führt zu Produktivitätssteigerungen, sodass in einigen Fällen mit dem Matrizenpressen vergleichbare Produktionsraten erreicht werden.

Das Kaltisostatische Pressen wird als Formgebungsverfahren für ein breites Erzeugnissortiment angewendet, keramische Zündkerzenkörper (eine Hauptanwendung des Dry Bag-Verfahrens), feuerfeste Tiegel, Hartmetallteile (z.B. Walzen und Matrizen), Wolfram-Schwermetalle, Halbzeuge aus Schnellarbeitsstählen, Wolfram- und Molybdänelektroden für Lichtbogenöfen und lange zylindrische Filterelemente. In der Formgebung von PM-Bauteilen aus niedriglegierten Stählen hat sich das Verfahren jedoch nicht durchgesetzt.

Heißisostatisches Pressen (HIP) findet ebenfalls breite Anwendung bei der Verdichtung von Pulvern. Weil es nicht möglich ist, ein flüssiges Druckmedium zu nutzen, wird Argongas verwendet. Außerdem sind organische Elastomere als Containermaterial ungeeignet und man verwendet in der Regel Metallcontainer, die man auch als Kapsel bezeichnet. Da bei den angewendeten Temperaturen bereits ein Sintern stattfindet, spielt die Grünfestigkeit keine Rolle. Pulver mit sphärischen Partikeln weisen die höchsten Schüttdichten auf und werden deshalb bevorzugt eingesetzt. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für die Herstellung von Halbzeugen aus Superlegierungen, Schnellarbeitsstählen, Keramiken usw. verwendet, wo die Defektfreiheit des Materials eine Hauptforderung ist.

Sinter-HIP

Bei gesinterten Metallen ist eine relative Dichte von etwa 92% ausreichend, um sicherzustellen, dass keine offene, an die Oberfläche reichende Porosität mehr vorliegt. Wenn zudem unter Vakuum gesintert wurde und sich in den geschlossenen Poren kein Gas befindet, können

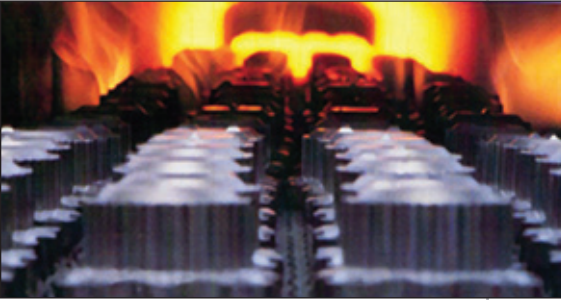


Bild 9: PM-Formteile beim Eintritt in einen Bandsinterofen (AMES S.A.)

solche Teile ohne Kapsel durch Heißisostatisches Pressen vollständig verdichtet werden. In einem weiterentwickelten Verfahren werden das Sintern und das nachfolgende Druckverdichten in der gleichen Anlage durchgeführt. Der Ofenraum wird zunächst evakuiert, auf Sinteremperatur aufgeheizt und schließlich zu einem bestimmten Zeitpunkt Argongas bis zu einem hohen Druck eingeleitet.

Dieses als Sinter-HIP oder druckunterstütztes Sintern (PAS - Pressure Assisted Sintering) bezeichnete Verfahren hat den zweistufigen Ablauf der Herstellung von Hartmetallwerkzeugen und -bauteilen durch Vakuumintern und anschließende Nachverdichtung durch HIP inzwischen fast vollständig abgelöst. Es ist sehr wahrscheinlich, dass das Verfahren auch für andere Zwecke Anwendung finden wird.

Ceracon-Prozess

In den 1980er Jahren wurde eine Anzahl von Verfahren entwickelt, die unter dem Oberbegriff „Pseudo-HIP“ zusammengefasst werden können, jedoch konnte nur der Ceracon-Prozess eine Marktnische besetzen.

Der Begriff Ceracon ist abgeleitet aus „ceramic granular consolidation“. Es wird ein erhitztes keramisches Granulat direkt in ein Presswerkzeug gegeben und anschließend ein vorgewärmter Pressling oder eine Gruppe von Presslingen darin eingebettet. Das Keramikgranulat wirkt während der Verdichtung durch uniaxiales Pressen als Druckübertragungsmedium, sodass ein pseudoisostatisches Pressen erfolgt. Durch die Verdichtung und Verformung des Presskörpers werden bei richtiger Wahl der Bedingungen 100% dichte Teile erhalten. Die Zykluszeit unter Druck bewegt sich im Bereich von Sekunden. Der Pressstempel wird, nachdem der angestrebte Druck erreicht wurde, sofort wieder entlastet. Nach dem Pressen werden die Keramikteile

durch Auswerfen des Werkzeuginhaltes und Separierung von Bauteilen und Keramik-Granulat voneinander getrennt. Durch Nutzung eines Roboters für das Handling von Keramikgranulat und Presslingen kann das System vollständig automatisiert werden. Eine Vielzahl von Formen, wie z.B. Pleuel, ist auf diese Weise herstellbar.

Hochgeschwindigkeitspressen (High Velocity Compaction – HVC)

HVC ist eine Presstechnologie, die von den Firmen Höganäs AB und Hydropulsor AB um das Jahr 2000 entwickelt wurde. Die Technologie sieht eine Verdichtung in weniger als 20 Millisekunden durch Einwirkung eines Hochenergieimpulses vor. Eine weitere Verdichtung ist durch wiederholte Impulse, zwischen denen nur Intervalle von ca. 300 ms liegen, möglich. Bei Presskörpern aus vorlegierten und diffusionslegierten Fe-Pulvern erzielt man Dichten im Bereich 7,4 bis 7,7 g/cm³.

Die Methode ist potenziell besonders interessant für die Herstellung großer Komponenten (d.h. Gewichte bis zu 5 kg). Jedoch ist sie, ebenso wie das konventionelle Hochdruckpressen, zunächst auf „klobige“ Geometrien beschränkt. Allerdings wird über Versuche berichtet, die Technologie auf kompliziertere Bauteile auszuweiten. Schrägverzahnte Zahnräder sind bei diesem Verfahren kaum vorstellbar, aber die Herstellung von Stirnrädern mit gerader Verzahnung wurde mit Dichten über 7,5 g/cm³ bereits demonstriert.

Rapid Manufacturing

Einige Formgebungsverfahren, die ursprünglich auf Rapid Prototyping zielten, wurden inzwischen für die Produktion kleinerer Stückzahlen von Bauteilen aus verschiedenen Metallpulvern weiterentwickelt. In der Literatur sind für diese Verfahren auch die Bezeichnungen „Freeform Fabrication“ oder „Direct Writing“ gebräuchlich.

Am Anfang stand hier das Selektive Lasersintern, das den schichtweisen Aufbau eines 3-dimensionalen Körpers bewerkstelligt, indem ein Laserstrahl über ein Pulverbett rastert und dabei das Pulver lokal versintert. Es konnten aber nur bestimmte Materialien verarbeitet werden. Auch die erreichbare Sinterdichte war durch die geringe Packungsdichte des Ausgangspulverbettes

begrenzt und für die Anwendung geeignete Bauteile konnten generell nur durch Infiltration nach dem Sintern hergestellt werden.

Ein deutlich höheres Potential kommt einer Reihe von 3-dimensionalen Pulverschmelzmethoden zu.

Hier wird unterschieden nach Verfahren, die ein Pulverbett verwenden (ähnlich dem Selektiven Lasersintern), und solchen, die das Pulver in einen energiereichen Strahl injizieren. Für beide Fälle gibt es bereits ausgereifte kommerzielle Verfahren und Anlagen, wobei entweder ein Laser- oder ein Elektronenstrahl als Energiequelle genutzt wird.

Bei den Pulverbettmethoden rastert der Energiestrahle zum Aufbau der 3-dimensionalen Struktur Schicht für Schicht ab und schmilzt jedes einzelne Pulverteilchen auf. Dem Wesen nach handelt es sich also um Mikrogießverfahren. Kommerziell verfügbare Methoden sind das SLM (Selective Laser Melting) und das EBM (Electron Beam Melting).

Bei den Pulverinjektionsmethoden wird die 3-dimensionale Form des Bauteils aus Metalltröpfchen aufgebaut, die durch Eindüsen von Pulver in einen Energiestrahle erzeugt werden. Man könnte dies auch als Auftragsschweißen im Mikromaßstab ansehen. Eingeführte Verfahren sind: Lasform, LDMD (Laser Direct Metal Deposition), DMD (Direct Metal Deposition) und LENS (Laser Engineering Net Shaping).

Die genannten Methoden können für geringe Stückzahlen wettbewerbsfähig sein, da die Herstellung eines Werkzeuges, wie für die konventionelle Produktion notwendig, entfällt. Sie sind außerdem sehr interessant für die Herstellung von Formteilen, die mit keinem anderen Verfahren herstellbar sind. Jede Form, die mit CAD konstruiert wird, ist mit diesen Verfahren auch produzierbar.

SINTERN

Wie der Ausdruck „Sinterteil“ schon sagt, ist das Sintern eine Schlüsseloperation der gesamten Verfahrenskette. Hier erhält der Presskörper die für die Bauteilfunktion benötigte Festigkeit. Ganz allgemein erfordert Sintern hohe Temperaturen.

Die ISO-Definition des Sinterns lautet: „Wärmebehandlung eines Pulvers oder eines Presskörpers bei einer Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur des Hauptbestandteils mit dem Ziel, die Festigkeit zu erhöhen, indem sich die Pulverteilchen miteinander verbinden.“

Theorien über die während des Sinterns genau ablaufenden Prozesse waren Gegenstand unzähliger Konferenzen und wissenschaftlicher Veröffentlichungen, sollen aber hier nicht weiter interessieren.

Es mag reichen zu sagen, dass dabei Atome diffundieren und die beim Pressen gebildeten Teilchenkontakte wachsen bis sie gar nicht mehr als einzelne Kontaktflächen erkennbar sind.

Rekristallisation und Kornwachstum können folgen, die Poren tendieren zur Abrundung und der Volumenanteil der Gesamtporosität nimmt ab.

Der technische Sinterprozess wird nahezu ausnahmslos unter einer Schutzgasatmosphäre ausgeführt, weil sehr große Oberflächen vorliegen und die Temperaturen zwischen 60 und 90% der Schmelztemperatur des jeweiligen Metalls oder der Legierung betragen. Bei Pulvermischungen ist es jedoch möglich, dass die Sintertemperatur über der Schmelztemperatur der niedriger schmelzenden Komponente liegt, z.B. bei Kupfer/Zinn-Legierungen, Eisen/Kupfer-Sinterteilen, Wolframcarbid/Cobalt-Hartmetallen. Das Sintern findet in all diesen Fällen bei Anwesenheit einer flüssigen Phase statt, daher der Ausdruck „Flüssigphasensintern“.

Natürlich muss die Menge an flüssiger Phase begrenzt werden, um einen Verlust der Formstabilität des Bauteils zu vermeiden. Für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist eine genaue Kontrolle der Aufheizgeschwindigkeit, der Haltedauer, der Sintertemperatur und der Gasatmosphäre erforderlich.

Der meistgenutzte Ofentyp ist ein elektrisch beheizter Ofen, den die Teile auf einem aus Drahtgeflecht hergestellten Förderband passieren. Das Förderband und die Heizer bestehen aus modifizierten 80/20 Nickel/Chrom-Legierungen und zeigen vertretbare Lebensdauern bis zu einer Temperatur von 1150°C.

Für höhere Sintertemperaturen werden Hubbalkenöfen bevorzugt. Die Zahl ihrer Anwendungen nimmt zu, da die Anforderungen an die Festigkeit der Sinterteile steigen. Die eingesetzten Siliciumcarbid-Heizelemente sind für Temperaturen bis 1350°C geeignet.

Für Spezialfälle mit noch höheren Temperaturen können Heizelemente aus Molybdän verwendet werden, wobei jedoch spezielle Probleme, die mit der Bildung des leichtflüchtigen Molybdänoxides verbunden sind, beachtet werden müssen. Molybdänöfen werden aus diesem Grund nur mit einer sehr reinen Wasserstoffatmosphäre betrieben.

Schutzgasatmosphären

Sie sind für fast alle Sinteroperationen erforderlich, um die Sinterteile vor Oxidation zu schützen und vorhandene Oberflächenoxide zu reduzieren.

In der Praxis werden meist trockener Wasserstoff, Stickstoff-Wasserstoff-Gemische oder teilverbrannte Kohlenwasserstoffe verwendet, wobei auf das erstgenannte Gas oft aus Kostengründen verzichtet werden muss. Wasserstoff wird dennoch beim Sintern von Hartmetall und bei der Herstellung von Alnico-Magneten eingesetzt.

Ammoniakspaltgas, das 75% Wasserstoff und 25% Stickstoff enthält, lässt sich einfach als sauerstoff- und wasserdampfrees Gas mit einem Taupunkt von ca. -50°C herstellen. Es kann oftmals reinen Wasserstoff bei nur einem Drittel der Kosten ersetzen mit Ausnahme jener Fälle, wo die Reaktion mit Stickstoff stört. Das Gas ist geeignet für das Sintern von Eisen, Stählen, rostfreien Stählen, Kupferlegierungen und besonders empfehlenswert für das Hochtemperaturesintern von Eisenlegierungen, deren Legierungselemente (z.B. Cr) sehr stabile, in anderen Atmosphären nicht reduzierbare Oxide bilden.

Bis in die jüngste Zeit wurden die am häufigsten angewendeten Sinteratmosphären - vor allem aus Kostengründen - durch Teilverbrennung von Kohlenwasserstoffen erzeugt. Durch Variation des Luft : Gas-Verhältnisses kann ein breiter Zusammensetzungsbereich eingestellt werden. Für die praktische Anwendung muss das Wasserdampf enthaltende Gas bis auf Taupunkte unter 0°C getrocknet werden, um zufriedenstellende Ergebnisse bei Eisenbauteilen zu erzielen.

Nach der Reaktion von Kohlenwasserstoffen, wie Methan, Propan oder Butan, mit Luft kann das Gas bis zu 45% Wasserstoff, etwas Kohlenmonoxid und -dioxid und ansonsten Stickstoff enthalten. Wegen der Endothermie der Reaktion muss Wärmeenergie zugeführt werden, was dem Gas seinen Namen „Endogas“ gab.

Wenn der Kohlenwasserstoff mit nur geringfügig unter der für die vollständige Verbrennung benötigten Luftmenge verbrannt wird, entsteht ein Gas, das nur 5% oder weniger Wasserstoff und sehr viel Stickstoff enthält. Wegen des exothermen Charakters der Reaktion heißt das Gas „Exogas“. Es ist die kostengünstigste Sinteratmosphäre, die verfügbar ist, jedoch ist ihr Reduktionsvermögen gering und die unvollständige Reduktion der im Presskörper vorhandenen

Oxide kann eine geringere Festigkeit des Sinterkörpers zur Folge haben.

Für Sinterstähle, d.h. Eisenlegierungen mit Kohlenstoff, ist das Kohlenstoffpotenzial der Atmosphäre sehr wichtig. Es sollte mit dem des Stahles im Gleichgewicht stehen.



Bild 10: Sinterofen für PM-Teile (ELINO Ofenbau GmbH)

Innerhalb des letzten Jahrzehntes haben sich für Fe-Basis-Sinterteile die sogenannten „synthetischen“ Atmosphären zunehmend durchgesetzt. Sie bestehen hauptsächlich aus Stickstoff, dem sorgfältig ca. 5 bis 10% Wasserstoff zugemischt wurde. Für das Sintern von Stählen wird oft in vorbestimmter Menge ein Kohlenwasserstoffgas zugegeben. Dies erhöht die Reduktionswirkung und vermindert den Gehalt an verbleibenden Oxiden, hat aber vor allem die Vorteile der hohen Reinheit, der Einstellbarkeit der Atmosphäre auf vorgegebene Zusammensetzungen (d.h. wenn die Atmosphäre „kohlenstoffneutral“ ist, wird der Kohlenstoffgehalt des Sintererzeugnisses nur von der dem Ausgangspulver zugesetzten Graphitmenge kontrolliert) und des geringen Wasserdampfgehaltes. Diese Vorteile wiegen den Nachteil der im Vergleich zu Endo- oder Exogas höheren Kosten in vielen Fällen auf.

Sinterhärten

Neue Sinterofentypen ermöglichen das Sintern niedriglegierter Sinterstähle bei neutralem Kohlenstoffpotential (ohne Ent- oder Aufkohlung) mit anschließendem Härten in einer Schrofkkühlzone.

Die Wärmebehandlung nach dem Sintern wird durch Hochgeschwindigkeitszirkulation von wassergekühltem Schutzgas in der Schrofkkühlzone des Ofens erreicht. Abkühlraten von bis zu 50 K/sec können zwischen 900°C und 400°C erreicht werden.

In den letzten Jahren wurden von den Pulverherstellern auch spezielle Pulversorten für Stähle mit hoher Härbarkeit entwickelt, die exakt auf die Eignung für das Sinterhärten zugeschnitten wurden. Diese Materialien sind oft „Hybride“ aus mit Mo fertigtelegiertem Pulver, während andere Legierungselemente diffusionsanlegiert oder durch den Binder in der Mischung stabilisiert zugesetzt werden. Andere Werkstoffe wurden für das Sinterhärten angepasst, indem geringe Anteile von weniger teuren Elementen, wie Cr und Mn, zulegiert werden. Dies führt zu einem homogenen, martensitischen Gefüge in den PM-Stählen.

Bei sintergehärteten Teilen werden enge Maßtoleranzen eingehalten, sodass man auf ein Kalibrieren oft verzichten kann. Die Kombination von Sintern und Härten in einem Prozess hat die Produktionskosten von niedriglegierten Stahlteilen, die nach dem Sintern eine Wärmebehandlung benötigen, weiter reduziert.

Zusätzliche Kosteneinsparungen entstehen bei einem Sinterhärteofen durch die unmittelbar im Ofen mögliche Erzeugung von Endogas über die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Luft und weiterhin dadurch, dass das aus der Sinterzone strömende Endogas zur Erwärmung der PM-Teile von Raumtemperatur auf ca. 500-600°C genutzt wird.

Vakuumsintern

Vakuum kann als spezieller Fall einer Schutzgasatmosphäre betrachtet werden und ist vom wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen wahrscheinlich die beste Sinteratmosphäre. Die Gase aus dem Inneren des Presskörpers werden leicht entfernt. Oxidationsempfindliche Metalle wie Aluminium, Beryllium, Niob und Tantal, deren Oxide auch von den am besten reduzierenden Gasatmosphären nicht reduziert werden, können gesintert werden.

Vakuumsintern ist jedoch sehr teuer, weshalb es nicht für die Massenproduktion von Standardteilen Anwendung finden wird, wenn die zuvor erwähnten Atmosphären zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Abgesehen von hohen Anlagenkosten und relativ geringen Produktionsraten, ist es schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, den Prozess kontinuierlich durchzuführen und zu automatisieren. Dennoch gibt es bestimmte spezielle Anwendungen, deren Anzahl und Umfang steigen, für die sich das Vakuumsintern zum Standard entwickelt hat, z.B. Schnellarbeitsstähle und andere hochlegierte Stähle (insbesondere Cr-haltige Stähle), Hartmetalle (insbesondere jene mit TiC, TaC oder NbC) und Titanlegierungen.

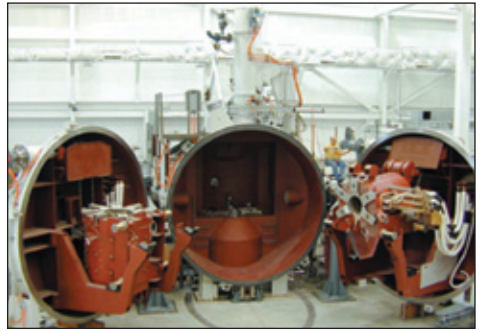


Bild 11: Doppeltür-VIGA-Verdüsungsanlage (ALD Vacuum Technologies)

Maßänderungen beim Sintern

Wie oben erwähnt, bewirkt das Sintern eine Festigkeitszunahme, indem es die Pulverteilchen durch Diffusion fester miteinander verbindet. Mit fortschreitendem Sintern nimmt auch die Dichte gewöhnlich zu, was die mechanischen Eigenschaften weiter verbessert. Ein Anstieg der Dichte bedeutet natürlich eine Schwindung des gesamten Teils, was zu Komplikationen führt.

Allerdings ist es auch möglich, dass beim Sintern die Bauteilabmessungen zunehmen, d.h. ein Schwellen eintritt.

Das Schwellen kann verschiedene Ursachen haben:

- (a) im Presskörper eingeschlossene Gase
 - (b) innerhalb des Bauteils durch Reduktion von Oxiden entstehender Wasserdampf
 - (c) Zersetzungsprodukte des Schmiermittels
- Schnelles Aufheizen und eine hohe Gründichte verstärken all diese Effekte und es kann nicht nur zu Schwelleffekten, sondern auch zur Blasenbildung und zur Verformung kommen. Solche Probleme müssen vermieden werden.

Eine weitere Ursache von Schwelleffekten, die sich aber grundlegend von den oben genannten unterscheidet, entsteht bei Verwendung von Mischungen aus Pulvern verschiedener Elemente. Typische Beispiele dafür sind Eisen-Kupfer- und Kupfer-Zinn-Mischungen (letzteres zur Bildung von Bronze). Der exakte Mechanismus, der das Wachstum auslöst, ist zwar noch nicht zufriedenstellend geklärt worden, aber es herrscht allgemeine Übereinstimmung, dass es sich um einen Diffusionseffekt handelt. Das stärkste Wachstum tritt zumeist oberhalb des Schmelzpunkts der niedrigererschmelzenden Komponente ein. In diesem Fall führen höhere Aufheizgeschwindigkeiten ebenfalls zu stärkerer Schwellung. Bei gut kontrollierten Verfahrensparametern

kann auch unter Produktionsbedingungen eine reproduzierbare Maßänderung eingehalten werden. Natürlich ist es notwendig, dies bei Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge zu beachten. Es ist aber auch möglich und wird zunehmend praktiziert, die Zusammensetzung und das Sinterregime so einzustellen, dass gar keine Maßänderungen auftreten. Es ist allerdings anzumerken, dass Maßänderungen auch von der Presskörperdichte beeinflusst werden. Je niedriger diese ist, umso größer ist die Tendenz zu schwinden. Das ist einer der Gründe, weshalb eine gleichmäßige Dichteverteilung im Presskörper von so großer Bedeutung ist. Wenn es stärkere Abweichungen der Dichte von einem Bauteilbereich zum anderen gibt, können die unterschiedlichen Schwindungen zum Bauteilverzug führen.

Flüssigphasensintern

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Anzahl von industriell genutzten Prozessen, bei denen in irgendeiner Stufe des Sinterns eine flüssige Phase auftritt. Dies beschleunigt den Sinterprozess erheblich und kann als ein Spezialfall des aktivierten Sinterns betrachtet werden. Typische Beispiele sind Zinn in Kupfer, Kupfer in Eisen, das Bindermetal (meist Cobalt) in Hartmetallen.

Sintern in der α -Phase

Ein weiterer Spezialfall des aktivierten Sinterns wurde in den 1990er Jahren entwickelt. Dabei wird zu Eisenbasiswerkstoffen ein Element zugesetzt, das die ferritische α -Phase bei Sinter Temperatur stabilisiert (die handelsüblichen Pulversorten enthalten 3,5% Mo entweder fertigelegiert oder gemischt). Die Sinteraktivität kann so erheblich gesteigert werden, da die Selbstdiffusion von Eisen bei gegebener Temperatur im Ferrit ca. 100mal schneller ist als im Austenit. Das Verfahren setzt voraus, dass sowohl die Legierung als auch die Sinteratmosphäre vollkommen kohlenstofffrei sind, da sonst Austenit stabilisiert würde. Das kohlenstofffreie Produkt kann nach dem Sintern leicht kalibriert werden. Wenn notwendig, wird Kohlenstoff zur Festigkeitssteigerung durch Einsatzhärten oder sogar durch Aufkohlung später eingebracht.

Über diese Prozessroute können, insbesondere in Kombination mit erhöhten Sintertemperaturen, Sinterdichten um $7,5 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden.

NACHBEHANDLUNG

Nachpressen

Selbst die beste in der Praxis durchführbare Prozesskontrolle kann gewisse Maßabweichungen der Bauteile, die aus dem gleichen Material und im gleichen Presswerkzeug hergestellt werden, nicht vollkommen unterbinden.

Typischerweise sind für die Teile im Sinterzustand Toleranzen von $0,002 \text{ mm}$ pro mm senkrecht zur Pressrichtung sowie von $0,004 \text{ mm}$ pro mm in Pressrichtung erreichbar. Die Genauigkeit kann durch ein Nachpressen im Anschluss an das Sintern noch erheblich verbessert werden. Dieser Schritt wird Kalibrieren genannt.

Das Kalibrieren kann in demselben Werkzeug durchgeführt werden, in dem auch das Pulver gepresst wurde, wenn die Abmessungsänderungen beim Sintern bei Null oder sehr nahe dabei liegen. Üblicherweise werden aber gesonderte Kalibrierwerkzeuge verwendet.

Ein Nachpressen kann auch genutzt werden, um die im Kontakt mit den Stempeln befindlichen Bauteiloberflächen zu prägen.

Während des Nachverdichtens nimmt die Dichte des Teils üblicherweise zu, besonders wenn die Sinterdichte gering war. In bestimmten Fällen, wenn es die Festigkeit und andere mechanische Eigenschaften erfordern, wird Nachverdichten gerade wegen der erzielbaren Dichtesteigerung und ihrer Wirkung auf die Eigenschaften eingesetzt. Eine zusätzliche Eigenschaftsverbesserung kann durch nochmaliges Sintern erreicht werden.

Heißisostatisches Pressen (HIP)

HIP wird zur Nachbehandlung verwendet, um Defekte und Mikroporosität in Hartmetallen zu eliminieren. Es wird vorausgesagt, dass die Wirtschaftlichkeit des Prozesses mit zunehmender Größe der HIP-Behälter so weit steigen kann, um ihn auch für die Herstellung völlig dichter Bauteile aus niedriglegierten PM-Stählen attraktiv zu machen.

Sinter-Schmieden

Dies ist eine Technik, bei der ein aus Pulver gepresster und gesinterter Rohling in einem geschlossenen Schmiedegesenk bei hoher Temperatur nachverdichtet wird, wobei sich die Form des Bauteils maßgeblich ändert, dieses gleichzeitig fast komplette Verdichtung erfährt und dadurch mechanische Eigenschaften erreicht werden, die denen traditionell geschmiedeter Bauteile ebenbürtig oder sogar überlegen sind. Im Einzelnen wird das Pulver- oder Sinterschmieden noch in einem späteren Kapitel behandelt.

Oberflächenverdichten

Es ist möglich, das Dichteniveau (und damit das Leistungsvermögen) von PM-Teilen durch eine geeignete Verformung nach dem Sintern zu vergrößern. Natürlich ist das Pulverschmieden ein seit langem dafür etabliertes Verfahren und ein gewisser Grad an Verdichtung kann auch durch das Kaltkalibrieren und Nachpressen erreicht werden. Andererseits ist das Oberflächenverdichten ein Verfahren, bei dem die Verdichtung nur lokal in jenen Gebieten, wo sie hauptsächlich benötigt wird, d.h. an den Oberflächenschichten des Bauteils, erfolgt.

Die Technologie wurde ursprünglich angewendet, um die Dauerfestigkeit im Wälzkontakt von PM-Lagerringen zu verbessern. Später kam sie jedoch auch für Zahnprofile von gerade- und schrägverzahnten Zahnrädern zum Einsatz, um die Biegewechselfestigkeit und die Kontaktdauerfestigkeit der Zähne zu verbessern.

Durch das Walzen eines bereits gezahnten PM-Formkörpers, der ein bestimmtes Übermaß an den Zahnkonturen aufweist, mit einem ebenfalls gezahnten Walzwerkzeug wird eine lokale Verdichtung an der gesamten Oberfläche des Zahnprofils bewirkt. Mit einer derart verdichteten Oberfläche verhält sich das PM-Bauteil bei einer nachfolgenden Einsatzhärtung ähnlich wie ein Zahnrad aus dichtem Stahl.

Tränken

Eine alternative Methode der Festigkeitssteigerung von porösen Bauteilen besteht im Auffüllen der miteinander und mit der Oberfläche verbundenen Poren mit einer Metallschmelze, die einen niedrigeren Schmelzpunkt hat. Druck ist dafür nicht erforderlich. Die Kapillarkräfte reichen aus, wenn die infiltrierende Schmelze das betreffende Metall benetzt. Es ist von Vorteil, wenn die Schmelze das feste Metall nur begrenzt löst, da sonst die Bauteiloberfläche angegriffen werden kann.

Der Prozess kommt häufig bei Eisenbauteilen zur Anwendung, wobei mit Kupfer getränkt wird. Um Oberflächenschädigungen zu vermeiden, wird auch oft eine eisen- und manganhaltige Kupferlegierung benutzt. Natürlich verliert Kupfer die Neigung, weiteres Eisen zu lösen, wenn die Kupferschmelze bereits mit Eisen gesättigt ist. Auch andere patentierte Tränkelegierungen sind am Markt erhältlich.

Wie im Abschnitt über Maßänderungen während des Sinterns beschrieben, kann die

Diffusion von Kupfer in Eisen aber zur Schwellung führen.

Das Tränkverfahren wird ebenfalls genutzt, um elektrische Kontaktwerkstoffe, wie Wolfram/Kupfer und Molybdän/Silber, herzustellen, wobei das Metall mit dem niedrigeren Schmelzpunkt im Kontakt mit einem bereits gesinterten Skelettkörper aus Wolfram bzw. Molybdän aufgeschmolzen wird.

Imprägnieren

Dieser Begriff wird für einen dem Tränken ähnlichen Prozess benutzt, nur dass in diesem Fall die Poren mit einem organischen Material anstatt eines Metalls ausgefüllt werden. Das herausragende Beispiel sind ölgetränkte Gleitlager, die in einem späteren Kapitel ausführlicher behandelt werden. In zunehmendem Maße wird das Imprägnieren auch mit aushärtbaren oder anderen Kunststoffen durchgeführt.

Durch diesen Prozess werden die mechanischen Eigenschaften geringfügig verbessert und Poren abgedichtet, wodurch Gas- und Flüssigkeitsdichtheit gewährleistet sind und ein Eindringen des Elektrolyten bei der galvanischen Beschichtung verhindert wird.

Zusätzlich verbessert sich die mechanische Bearbeitbarkeit gesinterner Bauteile, ein Aspekt, auf den später noch detailliert eingegangen wird.



Bild 12: Anlage zum Abschrecken in Öl (Hoeganaes Corp.)

Wärmebehandlung

Obwohl viele, vielleicht sogar die Mehrzahl, der gesinterten Formteile im Sinterzustand oder nach dem Kalibrieren eingesetzt werden, kommen doch große Mengen von Eisenformteilen, genauer Stahlformteilen, erst nach Härtung oder im angelassenen Zustand zur Anwendung. Man nutzt die üblichen Härtetechniken, wobei aber beachtet werden muss, dass wegen der meist noch im Sinterteil vorhandenen Porosität für die Abschreckung keine korrosiven Medien, wie Salzbad oder Wasser, verwendet werden dürfen, da es schwierig ist, ihre Rückstände aus den Poren wieder zu entfernen. Das Erwärmen sollte deshalb auch in einer Schutzgasatmosphäre erfolgen mit einem anschließenden Abschrecken im Ölbad. Diese Einschränkungen entfallen jedoch bei sehr hochverdichteten Teilen (Dichte > 7,2 g/cm³) oder bei Bauteilen, die vorher getränkt worden sind.

Randschichthärten

Das Aufkohlen oder Carbonitrieren von PM-Teilen ist weit verbreitet, wobei wiederum Gasatmosphären zu bevorzugen sind. Wegen der Porosität ist die Eindringtiefe generell größer und der Härteverlauf nicht so scharf wie bei dichten Stählen.

Dampfbehandlung

Die Dampfbehandlung ist ein Prozess, der ausschließlich für PM-Teile angewandt wird. Hierbei werden die Teile bei 500°C einem Hochdruckdampf ausgesetzt. Im Ergebnis entstehen Schichten aus Magnetit (Fe₃O₄) an allen zugänglichen Oberflächen, wodurch sich einige vorteilhafte Eigenschaftsänderungen ergeben:

- (1) Die Korrosionsbeständigkeit wird durch das Schließen der Poren verbessert.
- (2) Durch die im Oberflächenbereich reduzierte Porosität steigt die Druckfestigkeit.
- (3) Die Oxidschicht erhöht die Oberflächenhärte und, was wichtiger ist, die Verschleißbeständigkeit.

Der Dampfbehandlung folgt oftmals ein kurzes Eintauchen in Öl, was die blau/schwarze Färbung der PM-Teile verstärkt und die Korrosionsbeständigkeit noch erhöht. Die Dampfbehandlung ist nicht generell bei gehärteten bzw. angelassenen Teilen anwendbar, da die hohen Behandlungstemperaturen die Härtungseffekte rückgängig machen können.



Bild 13: Uhrenteile (ETA S.A.)

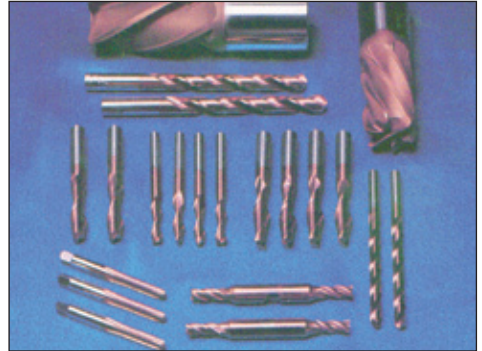


Bild 14: Mit Titan-Aluminium-Nitrid beschichtete Werkzeuge (Hilti AG)

Bläuen

Eine Exposition an Luft bei relativ niedrigen Temperaturen (200–250°C) kann gleichfalls genutzt werden, um eine dünne Magnetitschicht zu bilden, die eine geringfügige Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit ermöglicht. Die Verbesserungen sind jedoch geringer als jene nach einer Dampfbehandlung.

Galvanische Beschichtung

Gesinterte PM-Teile können nach den gleichen Technologien galvanisch beschichtet werden wie umgeformte oder gegossene Werkstoffe. Typische Beschichtungsmetalle sind Kupfer, Nickel, Cadmium, Zink und Chrom.

Es muss aber beachtet werden, dass PM-Teile mit einer niedrigen Dichte vorab versiegelt werden, z.B. durch eine Harzimpregnierung, um ein Eindringen des Elektrolyten in die Poren und nachfolgende Korrosion zu verhindern. In Öl abgeschreckte Teile lassen sich nicht erfolgreich beschichten, ohne das Öl vor der Harzversiegelung vollständig zu entfernen.

In Versuchen wurde gezeigt, dass auch nichtimprägnierte, poröse PM-Teile mit Nickel durch stromlose Abscheidung beschichtet werden können, wobei sowohl die Oberfläche als auch die der Poren, in die der Elektrolyt eindringt, mit Nickel bedeckt werden.

Beschichten

Ein großer Teil der Hartmetall-Schneidwerkzeuge wird heutzutage durch CVD (Chemical Vapour Deposition) oder PVD (Physical Vapour Deposition) beschichtet.

Der bei niedrigeren Temperaturen (~ 300–500°C) durchgeführte PVD-Prozess erlaubt auch, Stähle mit verschleißfesten Schichten aus TiC, TiN, Al₂O₃ oder Kombinationen davon zu versehen. Werkzeuge aus gesinterten Schnellarbeitsstählen werden ebenfalls oft beschichtet.

Mechanische Bearbeitung

Obwohl es einer der großen Vorzüge der Pulvermetallurgie ist, Bauteile direkt mit den gewünschten Abmaßen herstellen zu können, gibt es doch Einschränkungen hinsichtlich der Geometrien, die sich mittels Matrizenpressen herstellen lassen. Eine Nachbearbeitung, beispielsweise zur Herstellung von Querböhrungen oder Hinterschneidungen quer zur Pressrichtung, ist deshalb nicht unüblich.

Die vorhandene Porosität verändert die Bearbeitbarkeit und der Werkzeugverschleiß ist generell höher als bei einem dichten Werkstoff mit derselben Zusammensetzung. Hartmetallwerkzeuge sind zu empfehlen und es können geringere Schnittgeschwindigkeiten erforderlich sein.

Die Bearbeitbarkeit kann durch verschiedene Zusätze zur Pulvermischung – beispielsweise Blei, Kupfer, Graphit, Schwefel oder auch Mangansulfid – verbessert werden. Verbesserungen werden auch, wie bereits angedeutet, durch Tränken oder Harzimpregnierung erreicht.

Wenn man diese Punkte beachtet, können alle üblichen Bearbeitungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren, Gewindeschneiden, Reiben, Schleifen usw. – ohne weiteres angewendet werden.

Entgraten

Das Entgraten wird bei bereits gesinterten Teilen angewandt, um Überstände, die durch den Pressvorgang oder eine mechanische Bearbeitung entstanden sind, von den Kanten zu entfernen. Üblicherweise geschieht dies durch Trommeln, manchmal in einem flüssigen Medium, das ein Schleifpulver enthält. Dabei können gleichzeitig die Oberfläche geglättet und eine oberflächen-nahe Schicht verfestigt werden.

ERZEUGNISSE UND ANWENDUNGEN

Poröse Lager

Der Vorteil poröser Lager ist, dass ihre Poren mit Schmierstoffen gefüllt werden können, sodass es während der gesamten Lebensdauer der betreffenden Maschine keiner weiteren Schmierung mehr bedarf.

Die typischen Gleitlager bestehen aus Bronze. Als Ausgangsmaterialien können Elementarpulvermischungen aus Kupfer und Zinn, vorlegierte Bronzepulver, aber auch Kombinationen daraus dienen. Falls vorlegierte Bronzepulver Verwendung finden, tritt normalerweise eine Sinterschwindung ein, während mit Elementarpulvermischungen eine deutliche Schwellung zu beobachten ist.

Es ist offensichtlich möglich, durch Wahl des richtigen Anteils von vorlegiertem Pulver eine Situation einzustellen, bei der die Abmessungen des Fertigteils recht genau denen der verwendeten Matrize entsprechen. Auf diese Weise lassen sich die Presswerkzeuge dann auch für den Kalibrierungsschritt verwenden, der für Lager unabdingbar ist, um eine perfekte Passung zu gewährleisten.

Zusätzlich zum normalen Schmieröl wird den Pulvermischungen für Bronze-Lager häufig Graphit hinzugefügt. Es wird angenommen, dass dieser für die Ausbildung des Porennetzwerkes günstig ist und zusätzlich eine eigenständige Schmierwirkung entfaltet. Wichtig ist, dass die Poren ein verbundenes Netzwerk mit kontrollierter Porengröße und -volumen bilden, damit das Öl an der gesamten Lagerfläche zugeführt werden kann.

Die Menge der Ölzufuhr erhöht sich automatisch mit der Temperatur, d.h. mit höheren Umdrehungsgeschwindigkeiten, was rasch zu optimalen Betriebsbedingungen führt. Für die meisten Anwendungen sollte die Porosität zwischen 20 und 35 Vol-% liegen, wobei die obere Grenze durch die abnehmende Werkstofffestigkeit bedingt ist, da sich diese umgekehrt proportional zur Porosität ändert.

Für weniger kritische Anwendungen werden auch poröse Lager aus Eisen, Eisen-Kupfer oder Eisen in Verbindung mit Bronze eingesetzt, jedoch ist nach wie vor 90/10-Bronze wegen des geringen Reibungskoeffizienten, der hohen Verschleißfestigkeit und der geringen Fressneigung mit der Stahlwelle am weitesten verbreitet.

Die Verarbeitungsschritte umfassen das Pressen bei 150 bis 230 MPa, Sinterung bei

ungefähr 800°C für 5 bis 10 Minuten, gefolgt von Kalibrieren und Öl-Imprägnierung. Durch die kurzen Sinterzeiten sind sehr hohe Produktionsraten möglich.

Lager aus Fe-Werkstoffen haben den Vorteil einer höheren Festigkeit und weisen zudem einen ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie die Stahlwelle auf. Das Pressen wird hier mit 230 bis 380 MPa durchgeführt; anschließend wird unter Exo- oder Endogas oder auch unter Ammoniakspaltgas bei 1100 bis 1150°C für ungefähr 30 bis 45 Minuten gesintert. Es folgen Kalibrierung und Imprägnierung.



Bild 15: Selbstschmierende PM-Gleitlager (Oilite Bearings Ltd)

Porenfreie Lager

Pulvermetallurgisch hergestellte Lager aus Kupfer/Blei oder Kupfer/Zinn/Blei (Bleibronze). Für Hochleistungsanwendungen werden PM-Lagerwerkstoffe aus Kupfer/Blei oder Kupfer/Zinn/Blei (Bleibronze) mit Stahlrücken häufig angewendet.

Die Großserienherstellung erfolgt im kontinuierlichen Verfahren, bei dem eine lose Pulverschüttung auf ein Stahlträgerblech aufgesintert, anschließend bis nahe an die theoretische Dichte durch Walzen verdichtet und abschließend wärmebehandelt wird. Zusätzlich zum wirtschaftlichen Vorteil werden mit dieser Herstellungsmethode bessere Gefüge und Eigenschaften im Vergleich zu Gusslegierungen erzielt.

Blei ist zwar im flüssigen Kupfer oder in Bronze löslich, im festen Zustand dagegen praktisch unlöslich. Deshalb wird Blei, wenn solche Legierungen über Gießverfahren hergestellt werden, bei der Erstarrung ausgeschieden und liegt als grobe, inhomogen verteilte zweite Phase vor.

Bei der Herstellung von Pulvern durch Verdüsung erstarren die Schmelztröpfchen dagegen sehr rasch, wodurch eine feine und gleichmäßige



Bild 16: PM-Gleitlager (EPMA)

Verteilung kleiner Bleiteilchen in der Matrix realisiert werden kann. Für diese Anwendung werden bevorzugt sphärische Pulverteilchen verwendet, weil die Pulver dann eine bessere Fließfähigkeit und höhere Packungsdichte im Vergleich zu irregulär geformten Teilchen aufweisen.

Der Bedarf an Werkstoffen, die auch unter Bedingungen eingesetzt werden können, bei denen die Anwesenheit von Öl und Fett nicht akzeptabel ist, hat zur Entwicklung von Lagern für Trockenlauf geführt. Die PTFE-Lager sind ein klassisches Beispiel dieser Werkstoffgruppe. Polytetrafluorethylen (Teflon) ist ein aus Kohlenstoff und Fluor aufgebautes Polymer mit einem sehr geringen Reibungskoeffizienten und ist bis 300°C unter nahezu allen oxidierenden und korrosiven Bedingungen beständig. Die inhärenten Nachteile von PTFE, wie geringe Festigkeit, schlechte Wärmeleitfähigkeit und hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient, können überwunden werden, wenn metallische Pulver in das Polymer eingebracht werden. Für diese Anwendung wird üblicherweise Bronze verwendet.

Alternativ kann ein poröses metallisches Lager, meist aus Bronze, mit PTFE infiltriert werden, was hauptsächlich bei Lagerwerkstoffen mit Stahlrücken praktiziert wird.

Filter

Die gezielte Einstellung einer Porosität ist auch für die Herstellung von Filtern und Membranen von Bedeutung. Im Vergleich zu keramischen Werkstoffen sind die höheren Werte der Festigkeit, Schlagzähigkeit und Thermoschockbeständigkeit von Vorteil.

Eine genaue Kontrolle von Porengröße und Permeabilität wird durch Verwendung von Pulvern mit einer sehr engen Teilchengrößenverteilung erreicht. Die größte Verbreitung haben

Filterelemente aus sphärischen Bronzepulvern (89/11 Cu/Sn).

Die Filtergeometrie wird durch eine Form vorgegeben, in die man das Pulver lose einfüllt. Die schlechte Verpressbarkeit von kugeligen Pulvern ist somit kein Nachteil. Wenn Produkte mit geringerer Porosität oder lokalen Porositätsunterschieden gefordert sind, kann die konventionelle Presstechnik angewendet werden. Für diesen Fall eignen sich irregulär geformte Pulverteilchen besser.

Metallische Filter sind aus einem großen Werkstoffspektrum verfügbar, z.B. Kupfer, Nickel, Bronze, rostfreier Stahl und „Monel“, und finden breite Anwendung bei der Filtration von Schweröl, chemischen Lösungen und Emulsionen. Sie können auch sehr effektiv Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen voneinander trennen, was beispielsweise bei der Filtration von Flugzeugbenzin genutzt wird, wo gleichzeitig Wasser zuverlässig abgetrennt wird. Poröse Formteile werden auch für die Schalldämpfung an Luftkompressoren und ähnlichen Geräten verwendet.

Reibwerkstoffe

Gesinterte metallische Reibkomponenten sind besonders bei hochbelasteten Anwendungen, wie Flugzeugbremsen, Kupplungen und Bremsbelägen in Schwermaschinen usw. gefragt. Im Wesentlichen bestehen sie aus einer durchgängigen Metallmatrix, in die verschiedene Mengen nichtmetallischer, die Reibung erhöhende Phasen, wie Quarz und Korund, eingebettet sind.

Um die gewünschten Eigenschaften einzustellen, werden recht komplexe Zusammensetzungen gewählt. Kupfer, Zinn, Eisen, Blei, Graphit, Siliciumcarbid, Quarz, Korund und Asbestersatz können enthalten sein. Die gesinterten Reibwerkstoffe haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit und können in einem breiten Temperaturbereich eingesetzt werden. Über gute Leistungsfähigkeit wird bei Kupferbasiswerkstoffen bis 800°C Oberflächentemperatur berichtet, bei Eisenbasiswerkstoffen sogar bis 1000°C.

Der Verschleißwiderstand ist höher als bei kunstharzgebundenen Materialien, weshalb Bauteile geringerer Dicke verwendet werden können. Wegen ihrer großen Oberfläche und geringen Dicke sind die Bauteile wenig stabil. Die Reibschichten sind deshalb oft durch einen Stahlrücken verstärkt, mit dem sie durch Löten, Schweißen oder Drucksintern verbunden wurden.

Im Vergleich zu Reibelementen aus Phosphor oder Aluminiumbronzen bieten die gesinterten



Bild 17: Filter (Porvair Ltd.)

Werkstoffe viele Vorteile. Am wichtigsten ist dabei sicher der viel weitere Bereich, in dem die Reibeigenschaften durch Variation der nichtmetallischen Zusätze eingestellt werden können.

Mechanische Präzisionsteile

Für den überwiegenden Anteil der Präzisionsteile kommen Eisenbasis-Werkstoffe zum Einsatz, jedoch werden auch signifikante Mengen von Kupfer-, Messing-, Neusilber- und Bronzeteilen hergestellt.

Präzisionsteile aus Sinterstahl

Bei den oben beschriebenen Anwendungsfällen wurde die pulvermetallurgische Prozessroute gewählt, um Werkstoffe mit speziellen Eigenschaften herzustellen, die man auf anderem Wege gar nicht oder nur mit großen Schwierigkeiten erreichen kann.

Im Falle der Präzisionsteile sind die Gründe für den Einsatz der Pulvermetallurgie oft ganz andere. Die pulvermetallurgischen Produkte zeigen hier keine Eigenschaftsvorteile im Vergleich mit alternativen Prozessen, wie Gießen, Schmieden oder Stanzen.

Die Motive sind vielmehr wirtschaftlicher Art, d.h. die Einsparung von Kosten ist das Ziel. Auf den ersten Blick mag das schwer verständlich sein. Der Großteil der Präzisionsteile besteht im Wesentlichen aus Eisen und Eisenpulver und ist deutlich teurer als Eisen in kompakter Form.

Durch zwei wesentliche Faktoren der Kostenersparnis wird dieser Nachteil oft mehr als kompensiert:

(a) Sinterteile werden direkt mit Endabmessungen hergestellt, wodurch eine weitere Bearbeitung deutlich reduziert wird oder komplett entfallen kann

(b) als Folge von (a) ist die Materialausnutzung viel höher und es entsteht fast kein Abfall.

Die Einsparungen an Bearbeitungskosten im Verhältnis zu den Gesamtkosten steigen gewöhnlich mit abnehmender Bauteilgröße, weshalb die meisten pulvermetallurgisch hergestellten Teile bis vor Kurzem eher klein waren und ihre Masse selten ein Gewicht von 450 Gramm überschritt.

Ein weiterer Faktor sind die Größe und damit die Kosten der Pressen, die mit der Bauteilgröße steigen. Aus den gleichen Gründen ist auch die gute Verdichtbarkeit von Pulvermischungen von Vorteil, während vorlegierte Stahlpulver deutlich höhere Pressdrücke erfordern, um die gewünschte Dichte zu erreichen.

Wenn höhere Festigkeiten als die des unlegierten Eisens gefordert sind, werden üblicherweise Legierungselemente in Pulverform zugemischt. Die Auswahl ist auf solche Elemente beschränkt, die in technischen Atmosphären nicht oxidieren. Am häufigsten findet Kupfer Verwendung.

Kupfer hat den Vorteil, unterhalb der für Eisen üblichen Sinteremperatur von 1120°C zu schmelzen, was die Legierungsvorgänge beschleunigt.

Das billigste Element zur Verfestigung von Eisen ist natürlich Kohlenstoff, aber seine Verwendung in Sinterbauteilen setzt die Fähigkeit voraus, die Werkstoffzusammensetzung zu kontrollieren. Daraus folgt der Trend zu kohlenstoffneutralen, d.h. weder auf- noch entkohlenden Atmosphären (z.B. synthetische Stickstoff-Wasserstoff-Gemische). Kupfer beziehungsweise Kupfer und Kohlenstoff stellen immer noch die am häufigsten verwendeten Legierungszusätze dar.

Nickel und Molybdän werden ebenfalls als die Härbarkeit verbessernde Zusätze eingesetzt, wobei für reproduzierbare Effekte auf eine sehr homogene Verteilung zu achten ist. Dieses Erfordernis führte in den 1970er Jahren zur Entwicklung von diffusionslegierten Pulversorten. Ihre Herstellung beinhaltet einen Diffusionsprozess bei niedrigen Temperaturen, um die feinen Legierungspulver (Ni, Mo oder Cu) an die leicht verdichtbaren Reineisenpartikel zu binden. Durch diese Technik lassen sich hohe und reproduzierbare Härbarkeit mit der hohen Verdichtbarkeit der Grundpulver kombinieren.

Zusätze wie Graphit oder Schmiermittel können nicht über Diffusion an das Eisenpulver gebunden werden. Dies führte zur Entwicklung von bindergebundenen Vormischungen, in denen die Zusätze durch die Klebwirkung des Binders fixiert werden. Bindergebundene Vormischungen

wurden erstmals in den späten 1980er Jahren eingeführt und seit 2000 sind Sorten verfügbar, bei denen als Alternative zum Diffusionslegieren alle Legierungszusätze über den Binder an die Eisenteilchen gebunden sind. Diese Sorten können gegenüber den diffusionslegierten Varianten sogar Vorteile in der Schüttdichte und verbesserter Fließigenschaften aufweisen.

In den letzten Jahren wurden einige hochfeste bindergebundene Sorten entwickelt, die preiswerte Legierungszusätze für die Festigkeitssteigerung verwenden, wie Chrom, Mangan und Silicium. Da einige dieser Elemente stabilere Oxide bilden, muss beim Sintern solcher Sorten mehr auf den Taupunkt der Atmosphäre und/oder die Anwendung höherer Sinteremperaturen geachtet werden.

Im Verlauf des letzten Jahrzehnts wurde erkannt, dass bestimmte Legierungszusätze (speziell Mo) bei vorlegierten Pulvern nur geringe oder gar keine Verschlechterung der Verdichtbarkeit beim Pressen verursachen. So wurden einige Sorten, die in der Vorlegierung bis zu 1,5% Mo enthalten, speziell für das Einsatzhärten entwickelt. Heute sind Pulversorten erhältlich, welche das Vorlegieren mit Mo und das Diffusionslegieren oder das Anheften über den Binder für andere Legierungszusätze miteinander verbinden. Einige dieser Sorten wurden speziell entwickelt, um auf den Trend zum Sinterhärten zu reagieren.

Zur Erhöhung der Festigkeit wird auch das Tränken genutzt, wobei Kupfer mit einem kleinen Anteil an Eisen und Mangan zur Vermeidung von Erosion die am häufigsten verwendete Tränklegierung ist. Es ist nicht unbedingt notwendig, das gesamte Bauteil zu tränken, oft ist die lokale Infiltration hochbeanspruchter Bereiche ausreichend.

Der bei Sinterstahlbauteilen erreichbare Festigkeitsbereich wurde in den letzten zwei Jahrzehnten durch eine Reihe von Prozessentwicklungen, welche höhere Dichten zum Ziel hatten, deutlich erweitert. Die Weiterentwicklungen betreffen die Presstechnologie (z.B. Hochdruckkaltpressen, Warmpressen, Hochgeschwindigkeitsverdichtung), das Sintern (z.B. aktiviertes Sintern, α -Phasen-Sintern) oder dem Sintern nachfolgende Prozesse (z.B. Oberflächenverdichtung).

Als ein neues Instrument, um den Einsatz hochbelasteter Sinterstahlbauteile zu fördern, wurde im Jahr 2004 eine Onlinedatenbank für Konstrukteure und Ingenieure eingeführt (Global PM Property Database – GPMDB).

Ein weiterer bedeutender Fortschritt beim Einsatz von Sinterstahlbauteilen konnte in den letzten Jahren auch dadurch erreicht werden, dass Grenzen hinsichtlich der Bauteilgeometrie überwunden wurden. In einigen Fällen entfallen diese Einschränkungen, indem man zwei Bauteile herstellt und sie anschließend fügt, z. B. während des Sintervorganges. Dazu können Materialien mit unterschiedlichem Schwindungsverhalten für die verschiedenen Bauteile der Baugruppe verwendet werden, wodurch mechanische Spannungen entstehen, die ein Diffusionsfügen fördern. Es können aber auch Teile nach dem Sintern durch Kupferlöten oder Buckelschweißen gefügt werden.

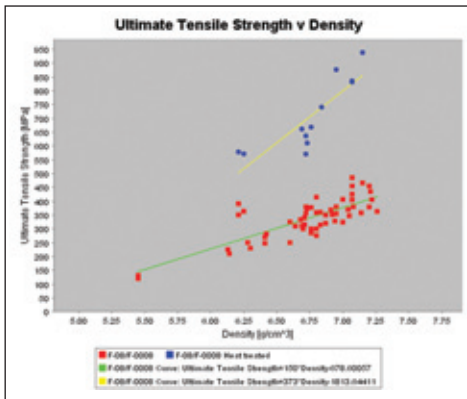


Bild 18: Darstellung der Zugspannung in Abhängigkeit von der Dichte (GPM2)



Bild 19: Planetenträger für Fahrzeuggetriebe (Ames S.A.)

Auf diese Weise können Hinterschneidungen und Querschnittsverengungen eingebracht werden.

Ähnliche Ergebnisse kann man auch bei Verwendung von „geteilten“ Werkzeugen erzielen. Die Matrize besteht dann aus zwei Teilen, deren Teilungsebene quer zur Pressrichtung liegt. Nach dem Pressen werden die beiden Werkzeughälften voneinander getrennt und das Bauteil wird in der Mitte entnommen. Bekannt ist das Verfahren auch unter der Bezeichnung Olivetti-Form.

Diese Fortschritte hinsichtlich der Formkomplexität der Bauteile und der Leistungsfähigkeit der Werkstoffe haben zu einer starken Erweiterung der Typenpalette von PM-Präzisionsbauteilen beigetragen.

Der Automobilbau hat sich weltweit zum dominanten Industriekunden für PM-Präzisionsteile entwickelt; 75–80 % aller pulvermetallurgisch hergestellten Sinterstahlteile gehen in diese Branche. Die Anwendungen im Automobilbau sind zwar recht vielfältig, aber Bauteile für den Motor und den Antrieb haben mit etwa 70 % der Anwendungsfälle besonderes Gewicht.

Anwendungen im Motor sind:

- Zahnriemenräder, Kettenräder, Naben
- Bauteile im Ventiltrieb - Ventilsitzringe, Ventilführungen, Teile der Ventilsteuerung
- Schwungräder
- Hauptlagerdeckel
- Sensoringe für das Motormanagement
- Öl- und Wasserpumpenzahnräder

Anwendungen im Antrieb bei manuellem und automatischem Getriebe:

- Bauteile des Synchronisierungssystems
- Kupplungs-naben
- Teile der Gangschaltung
- Planetenräder und -träger
- Turbinennaben
- Kupplungs- und Taschenplatten

Pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile kommen auch in anderen Systemen im Auto vor:

- Stoßdämpferkomponenten - Kolbenbolzenführungen, Kolbenventile und Endventile
- ABS-Sensoringe
- Abgasflansche, Flansche für Sauerstoffsensoren
- Zahnräder und Lager in kleinen Elektromotoren
- Türschlossteile
- Magnete in elektrischen Motoren

PM-Präzisionsteile haben darüber hinaus auch viele wichtige Märkte außerhalb der Automobilindustrie:

- elektrische Handwerkzeuge
- Haushaltsgeräte
- Büromaschinen
- Hobby- und Garten
- Industriemotoren und -steuerungen
- Beschläge (Schlossteile, Verriegelungen)

Eine Auswahl solcher Anwendungen wird in den Abbildungen dieser Publikation und als zusätzliche Beispiele auf der EPMA Webseite www.epma.com dargestellt.

Nichteisenformteile

Die Produktion von Formteilen aus Nichteisenwerkstoffen geschieht zwar in wesentlich geringerem Maße, sieht man von den Hartmetallen ab, aber doch in signifikanten Mengen aus Kupfer, Messing, Nickel-Silber, Bronze und auch die Herstellung von Aluminiumbauteilen auf Pulverbasis entwickelt sich gegenwärtig weiter.

Bronze

Bei Bronze gibt es einen wichtigen technischen Vorteil. Wegen des weiten Erstarrungsbereiches von Kupfer-Zinn-Legierungen ist es schwer, eine interdendritische Porosität in Bronzegussteilen zu vermeiden, weshalb druckdichte Pumpenbauteile und Hydraulikdichtungen kaum ohne größere Ausschussraten zu gießen sind.

Bei Anwendung der Pulverroute wird dieses Problem umgangen, da die normalerweise stets vorhandene Porosität im Sinterteil in Form von isolierten, kleinen Poren vorliegt und nicht als verbundene Porosität wie im Gussteil. Es liegen Dichten vor, die viel höher sind als die von selbstschmierenden Lagern.

Aluminium

Durch die Forderung der Automobilindustrie nach Gewichtsreduzierung hat die Verwendung von PM-Formteilen aus Aluminium in der letzten Zeit beträchtlich zugenommen. Lagerdeckel für Nockenwellen sind das herausragende Beispiel für solche Sinteraluminium-Genauteile.

Sinterschmiedeteile

Durch Sinterschmieden werden völlig dichte Sinterstahlbauteile, z.B. Fahrzeugpleuel, hergestellt. Die Produktion von traditionellen PM-Bauteilen ist wesentlich rascher gewachsen als der Maschinen- und Fahrzeugbau insgesamt. Als das Sinterschmieden in den 1970er Jahren entwickelt wurde, erwartete man davon eine weitere drastische Ausweitung der pulvermetallurgischen Industrie.



Bild 20: Synchronkörper (PMG Füssen GmbH)

Verfahren

In diesem Verfahren wird zunächst ein Pulverrohling gepresst, dessen einfache Form irgendwo zwischen der eines Schmiederohlings und der des fertigen Bauteils liegt. Dieser auch als Vorform bezeichnete Pulverpressling wird gesintert und anschließend in einem geschlossenen Gesenk auf Endform und Endabmessungen warmgeschmiedet. Der Umformgrad ist dabei ausreichend, um eine sehr nahe am völlig dichten Zustand liegende Enddichte zu erreichen, weshalb auch die mechanischen Eigenschaften mit denen eines konventionell aus dichten Rohlingen geschmiedeten Teils vergleichbar sind.

Vorteile:

Tatsächlich können die mechanischen Eigenschaften in mancher Hinsicht überlegen sein, da das Pulverformteil keine Vorzugsorientierungen, eine homogenere Zusammensetzung und ein feineres Gefüge aufweist. Weiterhin fehlen innere Defekte, die bei konventionellen Schmiedeteilen gelegentlich aus dem Gussrohling herrühren.

Ein weiterer Vorteil besteht in der hohen Maß- und Gewichtskonstanz, die ihre Ursache in der sehr genauen Pulverdosierung haben.

Einschränkungen

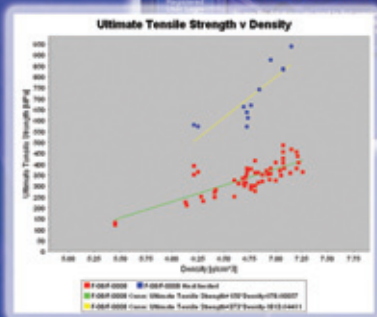
Hinsichtlich der Stahlsorten, die erfolgreich industriell eingesetzt werden können, beste-

Global Powder Metallurgy Property Database

www.pmdatabase.com

Use this online database to obtain comprehensive information on a range of PM materials.

- FREE Access/Registration
- Worldwide availability
- Supplier contact details
- Data output compatible with design packages



www.pmdatabase.com

hen jedoch Beschränkungen. Stähle, die zwar kostengünstige, aber leicht oxidierbare Legierungselemente, wie Chrom und Mangan, enthalten, sind schwierig zu verarbeiten. Stattdessen wurden spezielle Legierungen, die in der Regel Nickel und Molybdän enthalten, entwickelt. Die Oxide dieser Legierungselemente lassen sich in den normalen Sinteratmosphären leicht reduzieren.

Pulvergeschmiedete Stähle können in gleicher Weise wie konventionelle Stähle wärmebehandelt werden.

Die Produktionskosten beim Sinterschmieden liegen, vor allem wegen der höheren Pulver- und Werkzeugkosten, über denen des konventionellen Gießens oder Schmiedens. Die größere Genauigkeit der pulvergeschmiedeten Teile ermöglicht jedoch gewisse Einsparungen in der Nachbearbeitung, d.h. Investitionen in Werkzeugmaschinen können teilweise wegfallen.

Dies hat sich besonders bei der Herstellung von Pleueln für Verbrennungsmotoren bestätigt. Sintergeschmiedete Pleuel haben wegen ihrer höheren Maßgenauigkeit, besserer dynamischer Eigenschaften, des ruhigeren Motorenlaufes und deutlich geringerer Kosten einen erheblichen Marktanteil errungen.

In Nordamerika, Japan und Europa verfügen die entsprechenden Firmen inzwischen über große Produktionslinien, die im Wesentlichen Teile für die Automobilindustrie herstellen. Solche Teile können Innen- und Außenprofile verlangen, nockenförmig sein oder auch andere komplizierte Geometrien aufweisen, die aufwändige Nachbearbeitung erfordern.

Zu den bekannten Pleueln sind inzwischen andere Anwendungen hinzugekommen, Lagerringe, Getriebeteile und Zahnräder.

Hartmetalle und andere Hartstoffe

Unter dem Begriff Hartmetall wird eine Gruppe von harten, verschleißbeständigen Werkstoffen verstanden, die aus Einzel- oder Mischcarbiden der Elemente Wolfram, Tantal, Titan, Molybdän, Niob oder Vanadium bestehen, welche wiederum mit einem niedriger schmelzenden Metall (üblicherweise Cobalt) gebunden sind.

Als Hartstoff hat Wolframcarbide die größte Bedeutung. Durch Variation der Carbidgegröße, des Bindermetallgehaltes und der Sinterbedingungen können die Eigenschaften, wie Verschleißbeständigkeit, Bruchzähigkeit oder die Warmhärte, für die ausgewählte Anwendung optimiert werden. So ist bei der Anwendung in



Bild 21: Sintergeschmiedete Pleuelstange (Metaldyne Sintered Components)

Ziehwerkzeugen die Verschleißbeständigkeit am wichtigsten, während bei einem Schneidwerkzeug, besonders bei unterbrochenem Schnitt, eine hohe Schlagzähigkeit gefordert wird.

Die Herstellung von Sinterformteilen beginnt mit einer intensiven Mahlung des feinen Cobaltpulvers zusammen mit dem Carbidpulver (Teilchengrößen 0,2 bis 10µm). Die gemahlten Pulver sind, verglichen mit den in anderen PM-Bereichen verwendeten, extrem fein und zeigen deshalb eine schlechte oder überhaupt keine Fließfähigkeit. Um das Füllen der Presswerkzeuge erst zu ermöglichen, werden die feinen Pulver deshalb zu größeren Gebilden agglomeriert. Dieser Vorgang geschieht in erster Linie über das Sprühtrocknen. In den Agglomeraten ist das Gleitmittel für das Pressen bereits enthalten, so dass man sie in Presswerkzeugen in die gewünschte Form pressen kann. Die Presslinge werden im Wasserstoff oder unter Vakuum bei Temperaturen bis 900°C vorgesintert, um das Presshilfsmittel zu entfernen, und schließlich bei höherer Temperatur im Bereich 1200 bis 1500°C fertig gesintert. Im vorgesinterten Zustand lassen sich die Teile bereits bearbeiten, was für die Produktion von Kleinserien genutzt wird, für die sich eine Werkzeugherstellung nicht rentieren würde. In den meisten Fällen werden die Formteile jedoch durch Pressen in Matrizen und anschließendes Sintern in die gewünschten Endformen und -abmessungen gebracht. Auch Heißpressen in Graphitwerkzeugen kommt zur Anwendung. Industriell eingeführt ist auch das Heißisostatische Pressen, das zu besonders porenarmen Werkstoffen führt.

Andere Werkstoffe mit Metallboriden oder -nitriden als Hartstoff und einem metallischen Binder sind ebenfalls bekannt, finden aber nur

begrenzte spezielle Verwendung. Obwohl sie auch Hartstoff-Binder-Verbunde darstellen, werden sie üblicherweise nicht als Hartmetalle bezeichnet.

Diamantwerkzeuge werden über ähnliche Verfahrenswege hergestellt. In diesem Fall muss die ausgewählte Matrix die eingebetteten Diamanten möglichst fest binden, um das Werkzeug scharf-zuhalten. Jede Schneidanwendung erfordert eine spezielle Optimierung, weshalb verschiedene Bindersysteme, von Bronzen unterschiedlicher Zusammensetzung bis hin zu Hartmetallen, zur Auswahl stehen.



Bild 22: Beispiele für Hartmetallteile (Sandvik Hard Materials AB)

Sinterwerkstoffe für elektrische und magnetische Anwendungen

Elektrische Anwendungen

Verbundwerkstoffstrukturen, die nur über pulvermetallurgische Wege erzeugt werden können, haben breite Anwendung für elektrische Kontakte und Kollektorkomponenten gefunden.

In diesen Werkstoffen werden die hohen elektrischen Leitfähigkeiten und geringen Kontaktwiderstände von Silber oder Kupfer mit der Festigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und der Beständigkeit gegen Lichtbogenerosion von Wolfram, Molybdän, Nickel usw. oder mit den Gleiteigenschaften von Graphit kombiniert.

Magnetische Anwendungen

Wirtschaftliche und technische Vorteile ergeben sich auch bei der pulvermetallurgischen Herstellung von Bauteilen für magnetische Anwendungen. So kann eine Reihe von weichmagnetischen Werkstoffen günstig über Pulvermetallurgie produziert werden.

Eisen, Eisen-Silicium-Legierungen und Eisen mit bis zu 5% Phosphorzusatz werden in großem Umfang für Polschuhe und andere Bauteile in Gleichstromsystemen eingesetzt.

Bei Wechselstromanwendungen müssen außerdem die Wirbelstromverluste minimiert werden. Diese Verluste verhalten sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Materialdicke, innerhalb der die Ströme fließen können. Daraus leitete sich die Zielsetzung für die Entwicklung von weichmagnetischen Verbundwerkstoffen (Soft Magnetic Composites - SFC) ab. In diesem Material sind die einzelnen Pulverteilchen durch eine Kunstharzschicht voneinander isoliert, die bei einer Wärmebehandlung aushärtet. Die Wege des Stromflusses werden auf diese Weise auf

die Abmessungen des jeweiligen Pulverteilchens beschränkt.

Ein typischer Anwendungsfall für derartige Magnetwerkstoffe sind Kerne für Induktionsspulen in Hochfrequenzanlagen der Telekommunikation. Sintern im üblichen Sinne ist nicht erforderlich, jedoch werden die magnetischen Eigenschaften durch eine Wärmebehandlung zum Abbau der mechanischen Eigenspannungen noch verbessert.

Da hohe Anforderungen an die Reinheit und die genaue Zusammensetzung der Werkstoffe gestellt werden, kommen meist Elektrolyt-, Carbonyl- oder Permalloylegierungspulver als Ausgangsstoffe zum Einsatz.

Um auch Anwendungen bei niedrigeren Frequenzen zu erschließen, konzentriert sich die Weiterentwicklung der SMC auf die Suche nach geeigneten Isolationschichten auf den Pulverteilchen. Die Beschichtungen müssen die Wirbelströme wirksam beschränken, gleichzeitig aber auch hohe Pressdichten zulassen, um den von Fliehkräften herrührenden Spannungen im Material eine ausreichende Festigkeit entgegenzusetzen. Weiterhin werden so ausreichend hohe Sättigungsmagnetisierungen des Magnetwerkstoffes erzielt, die neben den geringen Kosten über den Wettbewerb mit Elektroblech-Laminaten entscheiden.

In Transformatoren kommen hochpermeable Sinterwerkstoffe in Form von Laminaten zum Einsatz. Die Herstellung von dünnen Blechen aus Nickel-Eisen- oder Permalloy-Legierungen nutzt dafür das Pulverwalzen als Formgebungsverfahren.

Eine andere Klasse von Magnetwerkstoffen, die über pulvermetallurgische Wege hergestellt werden, stellen die Ferrite dar. Durch die Kombi-

nation von Eisenferriten mit Oxiden zweiwertiger Elemente, wie Magnesium, Nickel, Mangan, Kupfer, Zink und anderer, sind sowohl weich- als auch hartmagnetische Eigenschaften in weiten Grenzen einstellbar. Die umfangreichste Anwendung haben „Weichferrite“ für Magnetkerne in Radio- und Fernsehgeräten gefunden.

Hartmagnetische Werkstoffe

Der weitaus überwiegende Teil der hartmagnetischen Werkstoffe wird heute über pulvermetallurgische Verfahren hergestellt.

In dieser Gruppe waren die schon erwähnten Ferrite mit hartmagnetischen Eigenschaften etwa ab 1930 die ersten aus Pulvern hergestellten Magnetwerkstoffe. Wegen der geringen Kosten sind Hartferrite mit einem Marktanteil von über 90% auch heute noch die am häufigsten verwendeten Magnete.

Kleine Dauermagnete mit präzisen Formen und Abmessungen der Typen Alnico, Cunife oder Cunico sind über Pressen und Sintern herstellbar, wobei äquivalente magnetische Eigenschaften erreicht werden mit gleichzeitig feinerem Gefüge und besseren mechanischen Eigenschaften als bei gegossenen Werkstoffen.

Stärkere Seltenerdmetallmagnete werden gleichfalls auf pulvermetallurgischem Wege hergestellt. Als erste kamen die Sm-Co-Magnete in Verwendung. Einen noch größeren Marktanteil konnten wegen der geringeren Kosten und des höheren Energieproduktes allerdings die später entwickelten Nd-Fe-B-Magnete erobern. Obwohl die Ferrite immer noch in der Tonnage dominieren, haben die Nd-Fe-B-Magnete bereits einen Umsatzanteil von 30% im Magnetwerkstoffmarkt erreicht, der rasch weiter steigt.

PULVERWALZEN

Unter Pulverwalzen versteht man ein inzwischen industriell etabliertes Verfahren, bei dem das Metallpulver kontinuierlich einem, ggf. auch heizbaren, Walzwerk zugeführt wird, wo es zwischen den Walzen zu einem Band verdichtet wird. Dieses läuft dann durch einen Sinterofen und wird abschließend auf Fertigmaß nachgewalzt.

Im Allgemeinen hat das Band keine technischen Vorteile gegenüber einem aus dem Gussstück gewalzten. In einigen speziellen Fällen ist aber eine bessere Homogenität festzustellen



Bild 23: Regensensorring (GKN PLC)

und auch Delaminationen, die von Gussdefekten herrühren, lassen sich vermeiden.

Die Hauptvorteile liegen im ökonomischen Bereich und hängen von folgenden Faktoren ab:

- Die Ausbeute an fertigem Band ist bei Gussrohlingen gering.
- Die Kosten für das Putzen des Gussrohlings, für das aufwändige Walzen, Zwischenglühen und das Beizen sind erheblich. Pulverwalzen ist in den Fällen besonders wirtschaftlich, wenn das Metall direkt beim Extraktionsprozess kostengünstig als Pulver anfällt, wie z.B. Nickel.
- Werkstoffe, die eine starke Kaltverfestigung zeigen und deshalb viele Zwischenglühungen und Beizoperationen bei der Dickenreduzierung des Walzbarrens erfordern, z.B. bei rostfreien Stählen.

Die Herstellung geringer Produktmengen von Spezialwerkstoffen über das Pulverwalzen nimmt beispielsweise für folgende Anwendungen zu: Cobalt- oder Nickellegierungsband für das Schweißen, Nickel-Eisen-Band für kontrolliertes Ausdehnungsverhalten, spezielle Cu-Ni-Sn-Legierungen für die Elektronik, poröses Nickelband für Alkalibatterien und Brennstoffzellenelektroden, Verbundlager usw.

ANDERE PRODUKTE DER PULVERMETALLURGIE

Viele frühe Entwicklungen der Pulvermetallurgie führten zu Produkten, die zwar kostengünstig, in ihren Eigenschaften den über andere Verfahren hergestellten Werkstoffen aber nicht ebenbürtig waren. Durch verbesserte Verdüsungstechniken, die reinere Pulver hochlegierter Werkstoffe, wie Schnellarbeitsstähle, komplexe ausscheidungs-härtbare Legierungen von Nickel oder Cobalt mit Chrom (bekannt als Superlegierungen) liefern, ist es möglich geworden, sogar bessere Eigenschaften über die pulvermetallurgische Verfahrenskette einzustellen.

Solche Pulver werden in evakuierten Metallkapseln isostatisch gepresst und anschließend in der Kapsel warmgeschmiedet, um einen dichten Block zu erhalten, der mit den üblichen Methoden dann zur Endform verarbeitet werden kann. Die Verdüsung erfolgt in diesem Fall mit Inertgas, üblicherweise Argon, ausgehend von einer durch Vakuum-schmelzen erzeugten Legierung. In zunehmendem Maße werden zentrifugalverdüste Pulver verwendet, z.B. nach dem REP-Verfahren hergestellte.

Die Vorteile der so hergestellten Werkstoffe sind:

- wesentlich gleichmäßigere Verteilung der Legierungselemente (keine Segregationen)
- keine Gussdefekte sowie
- feine und gleichmäßige Verteilung der Sekundärphasen (Carbide und Ausscheidungen)

Letzteres folgt aus der Tatsache, dass jedes Pulverteilchen mit hoher Abkühlgeschwindigkeit aus dem flüssigen Zustand abgeschreckt wird.

Ähnliche Vorteile ergeben sich bei Schnellarbeitsstählen, die über zwei verschiedene Routen pulvermetallurgisch hergestellt werden:

(1) Unregelmäßig gestaltete, wasserverdüste Pulverteilchen werden entweder in Matrizen oder isostatisch kaltgepresst und anschließend im Vakuum gesintert, um endformnahe Sinterteile zu erhalten oder

(2) ähnlich wie bei den Superlegierungen wird inertgasverdüstes Pulver (sphärisch) über HIP verdichtet und zum Halbzeug stranggepresst.

Eine Reihe von Verfahren wurde für die Herstellung von Near Net Shape-Teilen entwickelt. Viele davon stellen pseudo-isostatische Verdichtungsverfahren dar, bei denen der Druck mit einer hydraulischen Presse auf ein festes Drucktransfermedium aufgebracht wird, in dem

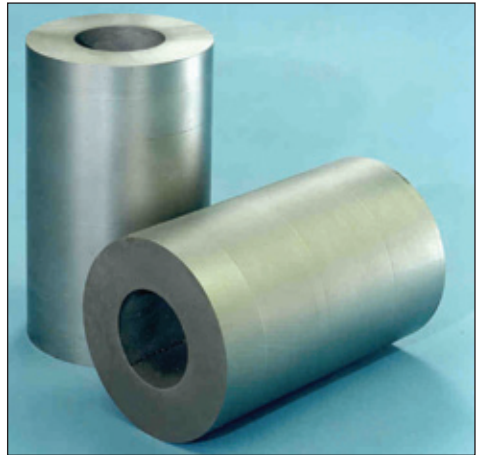


Bild 24: Hohlzylinder aus Schnellarbeitsstahl für die Herstellung von Schneidwerkzeugen im HIP-Zustand (Boehler Uddeholm Powder Technology)

das zu verdichtende Bauteil eingebettet ist. Das Transfermedium ist so ausgewählt, dass es bei Prozesstemperatur den Druck in allen Richtungen, ähnlich einer Flüssigkeit, gleichmäßig überträgt.

Zu diesen Verfahren gehört der bereits erwähnte Ceracon-Prozess. Ein anderes ist das sogenannte Flüssigmatrizen-Verfahren (fluid die process), bei dem das zu verdichtende Pulver in eine Matrice aus Metall gefüllt wird, welches bei Prozesstemperatur ausreichend weich ist, um sich fast wie eine Flüssigkeit zu verhalten.

Auf dem beschriebenen Weg werden beispielsweise Superlegierungsformteile in einem Flüssig-Werkzeug aus Kupfer-Nickel-Legierungen hergestellt.

METALLMATRIX-VERBUNDWERKSTOFFE (MMC)

Metallische Werkstoffe, die eine feinverteilte nichtmetallische Phase enthalten, sind bereits seit vielen Jahren bekannt. Man verfolgt damit die Idee, die gleiche verfestigende Wirkung wie beim Ausscheidungshärten zu erzielen und den Nachteil zu vermeiden, dass sich die ausgeschiedene Phase bei Temperaturerhöhung wieder auflöst und deshalb die Einsatztemperatur begrenzt ist.

Ein frühes Beispiel war das durch Pressen und Sintern von stark oxidierten Aluminium-Flakes erzeugte SAP-Material (sintered aluminium powder). Der gesinterte Werkstoff wurde anschließend noch einer intensiven Warmumformung unterzogen, um die Al_2O_3 -Schichten aufzubrechen und sie fein zu dispergieren. Zwar ergaben sich gewisse Eigenschaftsverbesserungen, für eine wirtschaftliche Umsetzung waren sie aber nicht ausreichend.

Die Situation änderte sich dramatisch als neue Verfahren für die Erzeugung der feinverteilten Nichtmetallpartikel entwickelt wurden. Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (metal matrix composites - MMC), wie diese Werkstoffklasse heute bezeichnet wird, stellen einen großen Schritt hin zu Werkstoffen mit deutlich verbesserten Hochtemperatureigenschaften dar. Die Pulvermetallurgie ist die wichtigste Herstellungsrouten für derartige Verbundwerkstoffe.

In den meisten Fällen wird als festigkeitssteigernde Phase ein stabiles Oxid eines anderen Metalls eingebracht, woher die häufig verwendete Bezeichnung ODS (oxide dispersion strengthening) rührt.

Es gibt eine Reihe verschiedener Verfahren, um die erforderliche feine Verteilung der Dispersoide zu erreichen. Eines davon besteht in der Wärmebehandlung des Ausgangsmaterials in einer Atmosphäre, die für das Matrixmaterial reduzierend, für das zweite Metall dagegen oxidierend wirkt. Dieses reagiert deshalb zum Oxid, das dann gleichmäßig verteilt in der Matrix vorliegt.

Im Fall von Edelmetallen – Ag, Pt usw. – kann die Glühung an Luft stattfinden. Eine Reihe so hergestellter Kontaktwerkstoffe, z.B. Silber mit Cadmiumoxid, Zinnoxid und/oder Indiumoxid, werden in großem Umfang eingesetzt.

Die interne Oxidation, wie der Prozess genannt wird, beruht auf der Diffusion von Sauerstoff durch das Kristallgitter des Silbers, was bei großen Materialdicken lange Prozessdauern erfordert.

Wenn jedoch ein Pulver so behandelt wird, ist eine kurze Glühung bereits ausreichend, so dass Pressen und Sintern eines intern oxidierten Pulvers den günstigsten Weg darstellen. In diesem Fall steht aber nicht die Festigkeitssteigerung im Vordergrund, sondern die Verbesserung der elektrischen Eigenschaften, z.B. die Verringerung der Verschweißneigung von elektrischen Kontakten.

Bei einer anderen Verfahrensvariante wird die manchmal auch als Salz vorliegende Metallmatrix mit einer Salzlösung des sauerstoffaffineren Metalls gemischt und in einer Atmosphäre

aufgeheizt, die reduzierend auf das Matrixmetall-oxid wirkt, aber oxidierend für das zweite Metall ist. ODS-Platin und -Wolfram werden auf diesem Wege hergestellt.

Andere Verbundwerkstoffkonzepte verwenden Fasern oder Whisker als Verstärkungskomponente.

Ein Prozess, der einen riesigen Schritt in der Entwicklung von Werkstoffen für sehr hohe Anwendungstemperaturen, speziell bei Turbinen in Flugzeugtriebwerken, darstellt, ist das mechanische Legieren.

Dieses Verfahren besteht in einer, üblicherweise in einem Attritor erfolgenden, langen Mahlung einer Mischung des Metallpulvers mit einer hochschmelzenden Verbindung, wobei die Teilchen der hochschmelzenden Verbindung zerkleinert und in das Matrixmetall eingearbeitet werden. Das „legierte“ Pulver wird nachfolgend verpresst, gesintert und üblicherweise noch durch Strangpressen oder Warmwalzen umgeformt.

Auf diese Weise hergestellte Superlegierungen befinden sich im Einsatz und auch Aluminiumlegierungen wurden bereits entwickelt. Für die Herstellung der Aluminiumwerkstoffe wird in analoger Weise das Aluminiumpulver mit Graphit vermahlen, der während der Prozedur in das Aluminium feinverteilt eingebettet wird und dort zu Aluminiumcarbid Al_4C_3 , reagiert.

Eine weitere Klasse von vollständig verdichteten Sinterwerkstoffen, die gerade erst aufkommt, wird aus sehr rasch aus der Schmelze erstarrten und abgekühlten Pulvern oder zerkleinerten Folien hergestellt, was zu metastabilen Ungleichgewichtszuständen im Material führt. Das Gefüge kann sowohl mikrokristallin als auch amorph ausgebildet sein.

Dieser Prozess ist nur für bestimmte Legierungen anwendbar, wobei im Matrixmetall wesentlich höhere Legierungsgehalte als es dem Gleichgewichtszustand entsprechen würde in Lösung gehalten werden können.

Unter der Voraussetzung, dass Verdichtung und Umformung bei ausreichend niedrigen Temperaturen ausgeführt werden, wo der Ungleichgewichtszustand erhalten bleibt, lassen sich herausragende mechanische Eigenschaften erreichen.

LITERATUR

W. Schatt, K.-P. Wieters, B. Kieback (Hrsg.)
„Pulvermetallurgie – Technologien und Werkstoffe“. Springer-Verlag. 2007

F.J. Esper, „Pulvermetallurgie“, Expert-Verlag, 1996

„**Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis**“. Tagungsbände des Hagener Symposiums für Pulvermetallurgie. **Hrsg. Hans Kolaska**, Fachverband Pulvermetallurgie, Hagen

„**Pulvermetallurgie der Hartmetalle**“, **Hrsg. Hans Kolaska**, Fachverband Pulvermetallurgie 1992

W.D. Jones, „Fundamental Principles of Powder Metallurgy“, Edward Arnold Ltd., London 1960

H.H. Hauser, „Handbook of Powder Metallurgy“, Chemical Publishing Corp., 1973

ASM Handbook – Powder Metal Technologies and Applications, Vol. 7, ASM International

L. F. Pease, W.G. West, „Fundamentals of Powder Metallurgy“

International Powder Metallurgy Directory and Yearbook Series, Inovar Communications Ltd., Shrewsbury.

R. M. German, „Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing“

R. M. German, „Powder Injection Moulding – Design and Application“

„**Powder Metallurgy Design Manual**“, MPIF

Powder Metallurgy – Materials, Processes and Applications, CD ROM, EPMA

Metal Injection Moulding – Manufacturing Process for Precision Engineered Components, EPMA



The image displays a collage of four screenshots from the EPMA online publications catalogue website. The top section features the title "EPMA Publications" in large, bold, white letters on a blue background. Below this, four screenshots are arranged in a 2x2 grid, each with a descriptive label in a blue box at the bottom:

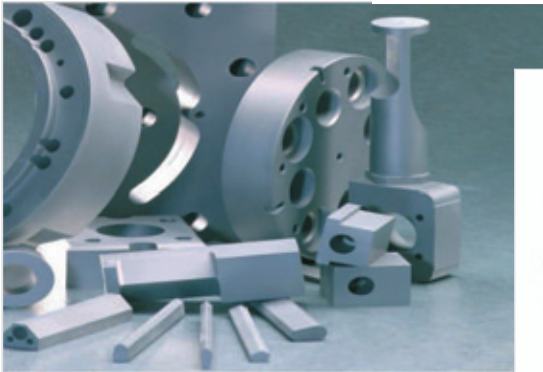
- Top Left:** A screenshot showing a search results page with a green "Available NOW" banner. Label: "Many PM publications to choose from".
- Top Right:** A screenshot showing a "Sale" section with a red banner and a small image of a book. Label: "Sale section".
- Bottom Left:** A screenshot showing a book cover with a blue and green graphic. Label: "Free & Exclusive titles".
- Bottom Right:** A screenshot showing a "Proceedings" page with a table of contents. Label: "Order online".

At the bottom of the collage, a white text box contains the following text:

EPMA online PM publications catalogue is one of, if not the most comprehensive listing of Powder Metallurgy and associated titles in Europe. All publications featured are English language titles, with some exclusive titles only available to the EPMA.

www.epma.com/onlinepublications

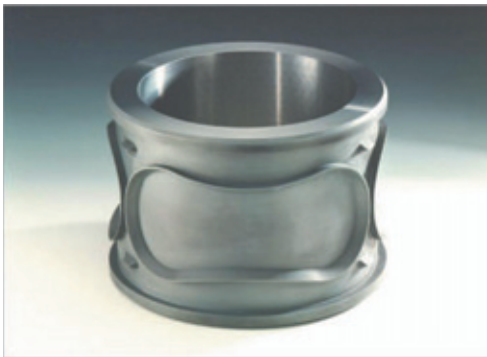
PULVERMETALLURGIE - QUALITÄT IN MATERIAL UND DESIGN



Verschleißteile aus Hartmetall (CERATIZIT Luxembourg S. à r.l.)



Kettenrad (GKN Sinter Metals)



WIDIA-Rotationsschneidwalze aus Hartmetall (Kennametal Deutschland GmbH)



Einspurritzel für Pkw Starter und Sinternarbe für Pkw Starter (BT Magnet-Technologie GmbH)



MIM-Teil für Motorroller (GKN Sinter Metals)



Schaltkulisse (Schunk Sintermetalltechnik GmbH)

Membership Benefits

10 Reasons to join the EPMA

- European and World PM Production Statistics and information.
- Access to Europe-wide PM Technology and Development Programmes.
- Networking opportunities at all levels at conferences, events and seminars.
- Information and Lobbying on Environmental legislation, such as REACH.
- Join the industry-wide Benchmarking programme.
- Significant Discounts on Training Courses, Technical Congresses and Exhibitions.
- Free 12-month listing on the World's Most Comprehensive PM website.
- Discounted PM publications, reports and journals.
- Keep up-to-date with weekly Email News bulletins and quarterly EPMA Newsletters.
- Have use of the 'Translated Glossary of Powder Metallurgy'.



Join today at www.epma.com/membership

FPM



INNOVATIV

PRÄZISE

EFFIZIENT

HOCHLEISTUNGSPRODUKTE

DER PULVERMETALLURGIE

Hersteller von Metallpulvern, Sinterformteilen und Hartmetallen
im Fachverband Pulvermetallurgie

www.pulvermetallurgie.com

