

Nanoforging – Forging in the Submicron and Nanoscale Range

Forging in the submicron and nanoscale range is currently forging on the smallest scale and is beyond what is visually and mentally tangible. The process also referred to as nanoforging employs similar technologies and tools to its macroscopic counterpart and combines the individual production of small-scale parts with the outstanding properties of the metals.

Nanoschmieden – Umformen im Submikro- und Nanobereich

Dr.-Ing. Andreas Landefeld, Braunschweig

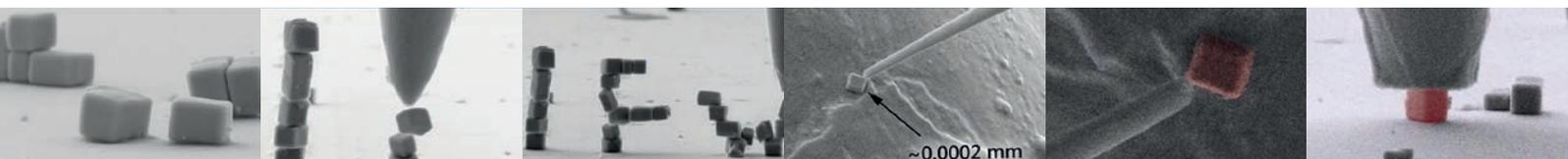


Abseits von dem visuell und mental Greifbaren stellt das Umformen im Submikro- und Nanobereich die derzeit kleinste Art der Umsetzung des Massivumformens dar. Das auch als Nanoschmieden bezeichnete Verfahren nutzt ähnliche Techniken und Werkzeuge wie das makroskopische Pendant und kombiniert die individuelle Fertigung von kleinskaligen Bauteilen mit den herausragenden Eigenschaften der Metalle.

Kleinste Bauteile für mechanisch beanspruchte Strukturen werden beispielsweise in der Mikro-technik für Sensoren und Aktoren benötigt. Auch im medizinischen Bereich wird zusehends versucht, Bauteilgrößen weiter zu reduzieren, um in der Diagnostik und Behandlung von Krankheiten gezielt auch in kleinste Bereiche wie zum Beispiel Blutgefäße mit Dimensionen von wenigen

Mikrometern vorzudringen. Gegenwärtig sind moderne Fertigungsverfahren herstellungsbedingt oft substratgebunden, das heißt sie sind durch einen flächenhaften Aufbau mit Details im Mikro- und Nanobereich gekennzeichnet. Diese flächenhaften Strukturen erreichen nicht die vielseitige Verwendung und hohe Funktionsdichte von real freistehenden Mikro- und Nanoobjekten.

Daneben sind typische, substratgebundene Verfahren wie die Lithographie lediglich auf eine geringe Anzahl an Materialien wie zum Beispiel Silizium beschränkt, was den Einsatz limitiert. Die Verarbeitung von Metallen ist insbesondere aufgrund der mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften bedeutsam. Versucht man allerdings übliche Fertigungsprozesse wie



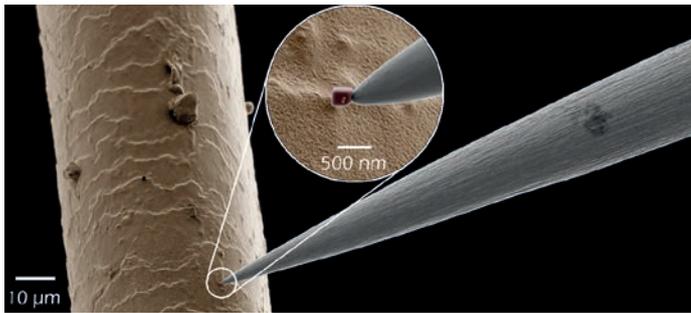


Bild 1: Metallischer Ni_3Al -Schmiedewürfel an einer Manipulationsspitze im Vergleich zur Größe eines menschlichen Haars. Der Nanowürfel kann allein durch adhäsive Kräfte mit der Manipulationsspitze positioniert werden.

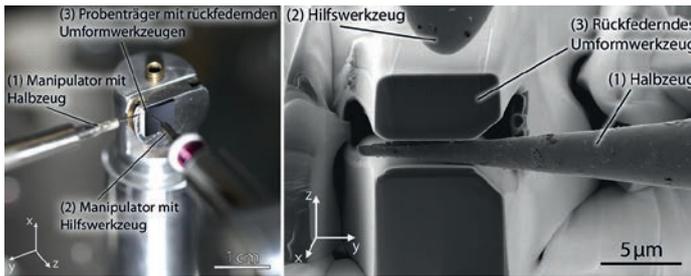


Bild 2: Die Nanoschmiede im Rasterelektronenmikroskop. Links ist eine Übersicht mit den Manipulatoren und rechts eine Detailansicht des Halbzeugs zwischen den ebenen Umformflächen des rückfedernden Umformwerkzeugs.

Gießen, Spanen und Fügen zu miniaturisieren, um die besonderen Eigenschaften der Metalle auch in winzigen Bauteilen umzusetzen, stößt man dabei schnell an Grenzen. Limitierungen ergeben sich neben dem Problem der Reduzierung der Maschinengröße und entsprechenden Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit auch in der grundsätzlich verschiedenen Skalierung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Stellvertretend soll an dieser Stelle auf die adhäsiven Kräfte eingegangen werden, die für den Zusammenhalt von Objekten verantwortlich sind und schon für Objekte im unteren Millimeterbereich gegenüber der Gewichtskraft überwiegen – ein Grund, weshalb sich Insekten mithilfe feiner Härchen an den Beinen auch kopfüber an mikroskopischen glatten Oberflächen bewegen können! Folglich ist die Steuerung adhäsiver Kräfte entscheidend – während die Schwerkraft für Prozesse im Mikro- und Nanobereich von untergeordneter Rolle ist. An dieser Stelle kommt das Umformen als ein Fertigungsverfahren ins Spiel, das gegenüber anderen Verfahren allein mit adhäsiven Kräften steuerbar ist und für den Fall des Freiformens bereits mit einfachen Werkzeuggeometrien enorme gestalterische Möglichkeiten zulässt. Eine Besonderheit des Nanobereichs ist zudem die hohe Duktilität bei Raumtemperatur. Selbst makroskopisch schlecht umformbare Metalle weisen eine enorme plastische Verformbarkeit im Nanobereich auf. Ursächlich sind zum einen die mit Probenvolumina abnehmende Defektdichte¹ und zum anderen das

Verhältnis aus Oberfläche und Volumen, welches mit abnehmender Objektgröße zunimmt. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, lassen sich mit dem Nanoschmieden enorme Umformgrade bei Raumtemperatur realisieren, beispielsweise am sonst plastisch schlecht formbaren Wolfram.

Als Rohmaterial erfordert das Nanoschmieden kleinste Halbzeuge, die mithilfe elektrochemischer Verfahren aus metallischen Drähten oder zweiphasigen Legierungen hergestellt werden. Nach diesem Prozess liegen unter anderem freistehende, kubische Ni_3Al -Partikel (im Fall einer zweiphasigen Ausgangslegierung) oder schlanke, nahezu zylindrische metallische Stäbe (im Fall eines drahtförmigen Ausgangsmaterials) vor. Die Ni_3Al -Partikel (Bild 1) sind freistehend und können mit feinen Manipulatorspitzen aufgrund der adhäsiven Kräfte positioniert werden.

Die stabförmigen Halbzeuge sind aufgrund des sich verdickenden Durchmessers auf 0,5 mm direkt mit den Manipulatoren steuerbar, an ihnen wird nachfolgend das Nanoschmieden beschrieben. Die erforderlichen Manipulatoren (MM3A-EM von Kleindieck Nanotechnik) werden über Piezomotoren gesteuert und sind in bis zu vier Achsen mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern positionierbar. In Bild 2 ist der prinzipielle Aufbau sowie die Anordnung in der rasterelektronenmikroskopischen Ansicht zu sehen. Die Manipulatoren nehmen die umzuformenden Halbzeuge (1) und Hilfswerkzeuge

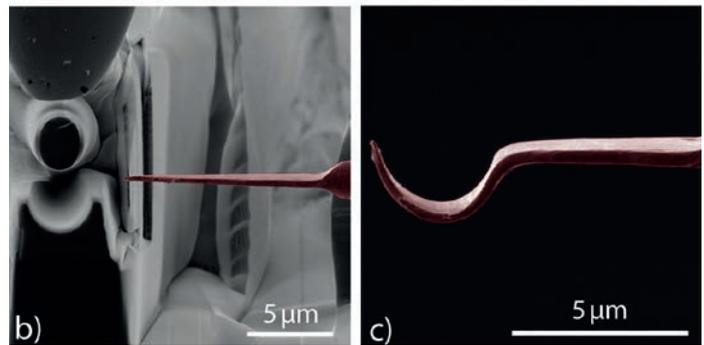
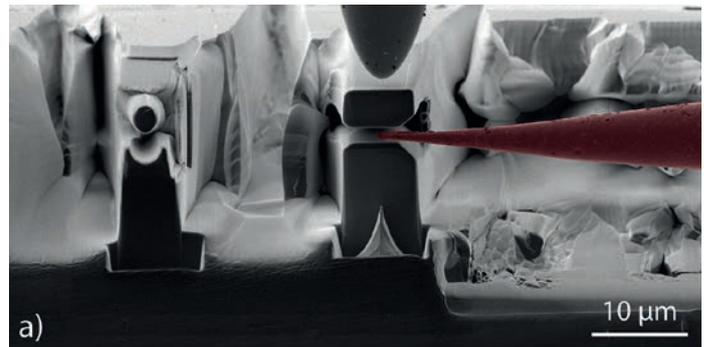


Bild 3: a) Gestaffelte Anordnung von rückfedernden Umformwerkzeugen (Flachsattel und Gesenkbiegewerkzeug). Mit dem Flachsattel geformtes Halbzeug aus Wolfram b) vor dem Gesenkbiegen auf und c) nach dem Biegen. Bilder: Autor

(2) auf und betätigen über das Hilfswerkzeug das rückfedernden Umformwerkzeuge (3), ähnlich wie in großen Umformpressen.

Nach der Entlastung des Umformwerkzeugs federt dieses in seine Ausgangsposition zurück und gibt das Umformteil frei, das entnommen oder umorientiert wird. Die rückfedernden Umformwerkzeuge werden aus einkristallinem Silizium gefertigt, das sich durch eine hohe Festigkeit auszeichnet. Die Formgebung dieser Werkzeuge erfolgt durch Abtragen mittels fokussierten Ionenstrahls².

Dieses Werkzeug ermöglicht das Einschneiden und davon ausgehende Absetzen oder das vollständige Trennen des Werkstücks. Die Gestaltung der Umformflächen ist nahezu beliebig. Mit entsprechend konturierten, rückfedernden Umformwerkzeugen konnten so neben den klassischen Freiformtechniken wie dem Recken, Breiten, Stauchen auch die Eignung für das Gesenkformen und das Biegeumformen gezeigt werden. Auf diese Weise kann sich eine zahnförmige Gesenkgravur auf das Halbzeug aus Wolfram abformen, das als Zahnwelle für die Übertragung mechanischer Kräfte eingesetzt werden kann.

Betrachtet man die Größe dieser Umformteile genauer, beträgt die Höhe eines Zahns (≈ 200 nm) weniger als ein Zehntel des Durchmessers eines roten Blutkörperchens (≈ 5 bis 8 μm) oder einem Hundertstel des Durchmessers eines Haars (≈ 50



bis 100 µm). Mit dem Nanoschmieden lassen sich neben der hohen Abbildungsgenauigkeit bis zu einigen zehn Nanometern, auch verschiedenste Umformtechniken untereinander kombinieren, indem mehrere Werkzeuge gestaffelt angeordnet werden (Bild 3a)). Mit dieser Anordnung wird im ersten Schritt das Halbzeug zwischen den ebenen Umformflächen des Flachsattels gereckt (Bild 3b)) und anschließend durch das Gesenkbiegen (Bild 3c)) in einem definiertem Bereich zu einem Halbkreis gebogen.

Schlussendlich kann der gewünschte Bereich mit dem oben beschriebenen Beißschneidewerkzeug vom Halbzeug abgetrennt werden. Das Ergebnis ist ein freistehendes Bauteil im Submikrobereich mit Details bis in den Nanobereich. Aktuelle Ideen und Versuche zielen auf die Fertigung von Spulen ab, die für die induktive Erwärmung oder magnetische Untersuchungen von kleinsten Objekten im Nanobereich geeignet sind. Der Spulendraht wird dabei aus einem stabförmigen Halbzeug mittels eines Rundsattels sukzessive in seinem Durchmesser auf etwa 50 nm reduziert, also zu einem Nanodraht geformt, und anschließend in einem Rollbiegewerkzeug zu einer Wicklung mit einem Durchmesser von etwa 1µm ausgeformt. Daneben gibt es noch

viele weitere Anwendungen, welche jedoch kaum Beachtung fanden, da es bisher keine geeignete oder letztendlich zu aufwendige Fertigungstechnik gab. Das Nanoschmieden gibt erste Lösungen.

In der demonstrierten Art und Weise wurde das Umformen zum ersten Mal im Submikro- und Nanobereich umgesetzt. Da massive, hochreine, metallische Halbzeuge verarbeitet werden können und keine Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung erfolgt, sind Umformverfahren für mechanisch hochbeanspruchte Nano- und Mikrosysteme künftig von enormer Bedeutung. Das Nanoschmieden ist, soweit bekannt, das einzige Fertigungsverfahren in diesem Größenbereich, welches die individuelle Gestaltung während des Prozesses zulässt und darüber hinaus visuell steuerbar und damit zu jeder Zeit kontrollierbar ist. Zukünftig gilt es, die Umsetzung weiterer Umformtechniken zu ergründen und so ein breites Gestaltungsrepertoire zu ermöglichen. Auch die Kombination mit Fertigungstechniken wie dem Bearbeiten mit dem Ionenstrahl führt zu einer großen Formvielfalt und erlaubt so die Verschiebung, der Fertigung maßgeschneiderter Bauteile: vom Makro- in den Nanobereich. ■

¹ Wahrscheinlichkeit für innere Defekte, wie zum Beispiel Versetzung, nimmt mit kleiner werdenden Volumen ab.

² Das Abtragen mit dem fokussierten Ionenstrahl (Ga⁺-Ionen) ist in einer Achse mit hoher Genauigkeit (≈ 50 nm) möglich. Für eine mehrachsige Bearbeitung muss die Arbeitsfläche umorientiert werden.



Dr. Andreas Landefeld

Weitere Ausführungen und Literaturtipps zum Nanoschmieden gibt es unter:
www.tu-braunschweig.de/ifw/forschung/neuwerkstoffe/nanoschmieden

Einen Kurzfilm finden Sie unter:
<http://www.nanospots.de/spots/2012/07/05/nanoschmieden-umformen-hochfester-metallwurfel/>

SchmiedeJOURNAL

Organ des Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen.
 ISSN 0933-8330

Herausgeber

Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V.

Redaktion

Chefredakteur: Frank Severin, V.i.S.d.P.
 Redaktionsassistenz: Friederike Schnittker
 Redaktionsbeirat: Dr. Frank M. Springorum
 Dr. Harald Dorth
 Dr. Theodor L. Tutmann

Layout: Grafik Design Peter Kanthak, Wickede

Anschrift der Redaktion: SchmiedeJOURNAL
 Goldene Pforte 1
 58093 Hagen, Deutschland
 Telefon: +49 2331 958828
 Telefax: +49 2331 958728
 E-Mail: schnittker@schmiede-journal.de
 Internet: www.schmiede-journal.de

Verlag

Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V.
 Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, Deutschland
 Telefon: +49 2331 958828, Telefax: +49 2331 958728
 E-Mail: orders@schmiede-journal.de
 Internet: www.schmiede-journal.de

Titelbild: Grafik Design Peter Kanthak, Wickede
 Anzeigenverwaltung: InterMediaPartners GmbH
 Gabriele Fahlbusch
 Beyeröhde 14
 42389 Wuppertal, Deutschland
 Telefon: +49 202 271690
 Telefax: +49 202 2716920
 E-Mail: fahlbusch@intermediapartners.de

Zurzeit gilt die Anzeigenpreisliste
 Nr. 20 vom 1.1.2015

Bezugspreis: Einzelheft 10,00 Euro plus Versandkosten
 und Mehrwertsteuer
 Bestellungen nimmt der Verlag entgegen

USt-IdNr.: DE 125 127 673

Druck: Domröse druckt GmbH, Hagen

Erfüllungsort
 und Gerichtsstand: Hagen

Das SchmiedeJOURNAL und die in ihm enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Namentlich gekennzeichnete Beiträge stellen nicht unbedingt die Meinung der Redaktion dar.

Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in Datenbanken. Markenzeichen, Handelsnamen, Patente und Verbrauchsmuster werden nicht immer ausdrücklich erwähnt. Dies bedeutet nicht, dass die beschriebenen Produkte ohne rechtlichen Schutz sind. Redaktion und Verlag übernehmen keine Haftung für unverlangt eingesandte Manuskripte oder Fotos.