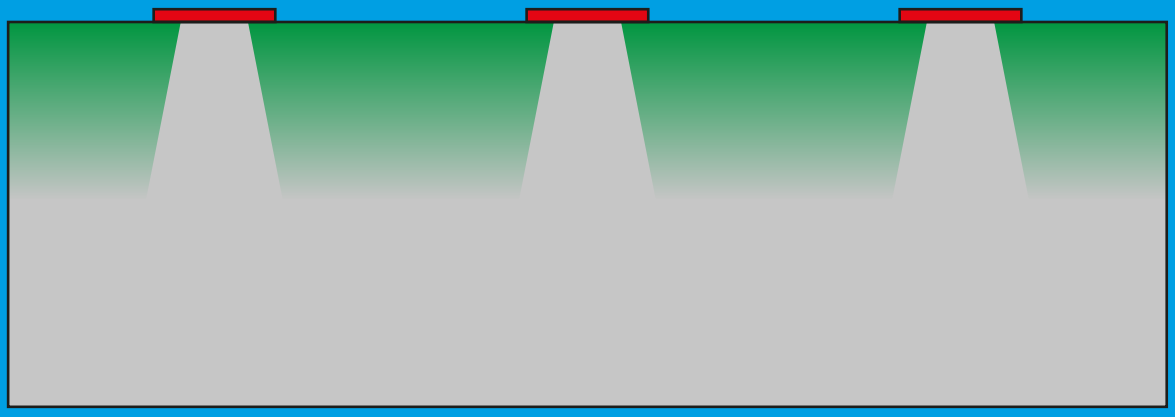
Belastungsangepasste strukturierte Diffusionsbehandlungen zur Verbesserung des thermomechanischen Rissverhaltens von Schmiedegesenken



Nitrierte Schmiedegesenke verfügen über ein vorteilhaftes Verschleißverhalten gegen Abrasion, da die entstehenden Randzonen eine höhere Härte aufweisen als vergütete Oberflächen. Neben diesem positiven Effekt wird die Duktilität der Randzone reduziert. Zur Verringerung der hohen thermischen und tribologischen Werkzeugbelastung werden in der Praxis Kühlschmierstoffe auf die Gesenkgravur appliziert, woraus eine thermozyklische Wechselbeanspruchung resultiert. Die auftretenden Zug- und Druckspannungswechsel können von der spröden Randzone häufig nicht schädigungsfrei aufgenommen werden, sodass Thermoschockrissnetzwerke entstehen.

AUTOREN

Dr.-Ing. Peter Dültgen

ist Geschäftsführer
der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und
Werkstoffe e. V. in Remscheid

Dr. rer. nat. Christian Pelshenke

ist Institutsleiter
am Institut für Werkzeuge und Werkstoffe (IFW)
der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und
Werkstoffe e. V. in Remscheid

Julius Peddinghaus, M.Sc.

ist Bereichsleiter
der Massivumformung am Institut
für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)
der Leibniz Universität Hannover

Martin Siegmund, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Umformtechnik und
Umformmaschinen (IFUM)
der Leibniz Universität Hannover
im Bereich Massivumformung

Dipl.-Ing. Hanno Paschke

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Fraunhofer-Institut für Schicht- und
Oberflächentechnik IST in Dortmund

Im Rahmen der hier vorgestellten Studie werden strukturierte Diffusionsbehandlungen entwickelt, um die Beständigkeit von Werkzeugen der Warmmassivumformung gegenüber Abrasion sowie thermomechanischer Rissbildung zu verbessern. Mittels Maskierungen werden lokale Bereiche der Werkzeugoberfläche abgedeckt, um nebeneinander angeordnete duktile und nitrierte Randzonen einzustellen. Die Stauchwerkzeuge werden in Serienschmiedeversuchen eingesetzt und hinsichtlich des Verschleißverhaltens charakterisiert. Dabei kann eine Verbesserung des thermomechanischen Rissverhaltens festgestellt werden.

STAND DER TECHNIK

Das Gesenkschmieden hat sich zur industriellen Produktion von Bauteilen in großer Stückzahl etabliert [1]. Wegen des sich einstellenden Faserverlaufs sind geschmiedete Bauteile dynamisch hoch belastbar und werden häufig in sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt, wie zum Beispiel in der Automobilbaubranche zur Herstellung von Kurbelwellen [2]. Die Wirtschaftlichkeit von Schmiedeprozessen ist von vielen Faktoren abhängig, wobei die Erhöhung der Werkzeugstandmenge eine erfolgversprechende Verbesserung darstellt [3].

Prozessbedingt werden Werkzeuge der Warmmassivumformung hohen mechanischen, thermischen, tribologischen und chemischen Belastungen ausgesetzt. Diese treten meist überlagert auf und führen zu unterschiedlichen Ausfallursachen der Schmiedegesenke. Der besonders kritische abrasive Werkzeugverschleiß wird maßgeblich von der Randschichthärte beeinflusst, weshalb sich Verfahren zur Randschichtmodifizierung etabliert haben [4]. Das Nitrieren stellt eine der am häufigsten verwendeten Verschleißschutzmaßnahme für Schmiedegesenke dar. Dabei wird die Randzone über Diffusionsprozesse mit Stickstoff angereichert und eine Nitrierzone gebildet [5]. Neben der hohen Härte der Nitrierzone wird die Duktilität reduziert. Schmiedegesenke stehen in unmittelbarem Kontakt mit den auf bis zu 1.270 °C erwärmten Rohteilen. Infolge der hohen thermischen Werkzeugbelastung entfestigt die Randzone, wodurch die Abrasionsbeständigkeit reduziert wird. Aus diesem Grund werden häufig Kühlschmierstoffe appliziert, um die Wärme aus dem Schmiedegesenk abzuführen und die Reibung zu reduzieren. Das zyklische Erwärmen und Abkühlen der Schmiedegesenke führt jedoch zu Zug- und Druckspannungswechseln in der Randzone. Aufgrund der herabgesetzten Duktilität nitrierter Schmiedegesenke können feine Rissnetzwerke entstehen, die zu Ausbrüchen neigen und frühzeitigen Werkzeugausfall begünstigen [4].

MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Zur Verbesserung des thermomechanischen Rissverhaltens von Schmiedegesenken wurde eine strukturierte Diffusionsbehandlung entwickelt. Mittels diffusionshemmender Abdeckpasten kann die Stickstoffdiffusion lokal unterbunden werden, sodass nebeneinander angeordnete nitrierte und duktile Randzonen auf einem Werkzeug realisierbar sind. Dazu wurden Strukturierungsroutinen erprobt, die eine hohe Reproduzierbarkeit ermöglichen und mit geringem Aufwand in der Industrie anwendbar sind.

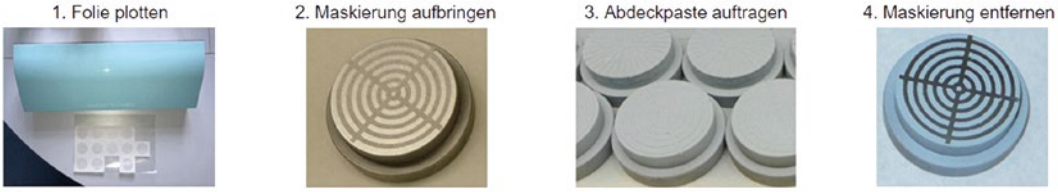


Bild 1: Strukturierungsroutine zur Diffusionsbehandlung ebener Stauchbahnen

DURCHFÜHRUNG STRUKTURIERTER DIFFUSIONSBEHANDLUNGEN

Die strukturierten Diffusionsbehandlungen basieren auf der Applizierung diffusionshemmender Abdeckpasten (zum Beispiel Avion Europa GmbH & Co. KG, Typ Blue Label). In Bild 1 ist die Strukturierungsroutine ebener Stauchbahnen dargestellt. Alle Stauchbahnen wurden aus dem Warmarbeitsstahl 1.2343 gefertigt und auf eine Härte 48 ± 2 HRC vergütet. Im ersten Schritt werden Folien geplottet und im zweiten Schritt auf die Funktionsflächen geklebt, die das Muster der Strukturierung als Negativform abbilden. Das Auftragen der Abdeckpaste erfolgt mittels Airbrush-Technik im dritten Schritt. Abschließend wird die Maskierung entfernt und die Diffusionsbehandlung der Stauchbahnen durchgeführt.

Als Strukturen wurden unter anderem Punkt- und konzentrische Kreismuster auf die Stauchbahnen aufgebracht. Weiterhin wurde die Strukturbreite zunächst auf 3 Millimeter festgelegt. Zu Referenzzwecken wurden auch rein vergütete und vollständig nitrierte Werkzeuge untersucht. Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurde eine an die Belastung des Schmiedeprozesses angepasste Struktur entwickelt. Diese weist einen hohen prozentual abgedeckten Oberflächenanteil von zirka 90 Prozent in der Werkzeugmitte auf (Punktmuster und eine reduzierte Strukturbreite von 1,5 Millimeter), die mit dem erwärmten Rohteil in Kontakt steht. Der angrenzende Bereich steht erst während der Umformung mit dem erwärmten Rohteil in Kontakt und wurde vollständig nitriert.

Die Diffusionsbehandlungen erfolgten mit einer Plasmanitrieranlage (Rübig Gesellschaft mbH & Co. KG. Anlagentechnik, Typ PN 100/150). Als erste Nitriervariante wurde eine Behandlungsdauer von 64 Stunden, eine Temperatur von 550 °C und ein Stickstoffgehalt von 50 Prozent eingestellt. Zusätzlich wurde eine Kombinationsdiffusionsbehandlung untersucht, die sich aus einer Plasmanitrocarburierung (8 Stunden, 530 °C, 60 Prozent N_2 und 15 Prozent CH_4) und einer nachfolgenden Nitrierung (8 Stunden, 530 °C und 80 Prozent N_2) zusammensetzt.

In Bild 2 sind exemplarisch obere Stauchbahnen dargestellt, die vergütet oder vollständig beziehungsweise strukturiert nitriert wurden (Punktmuster, konzentrische Kreismuster und an die Belastung des Schmiedeprozesses angepasst). Das Nitrieren dieser Stauchbahnen erfolgte für 64 Stunden bei 550 °C und 50 Prozent N_2.

UMFORMTECHNISCHE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Serienschmiedeversuche wurden auf einer Spindelpresse (Lasco Umformtechnik GmbH, Typ SPR 500) durchgeführt. Um eine Taktzeit von 30 Sekunden zu erreichen, welche neben der Rohteiltemperatur die thermomechanische Rissbildung beeinflusst, wurden die zylindrischen Rohteile (ø 30 x 40 Millimeter) aus dem Werkstoff 1.7225 induktiv auf 1.000 °C erwärmt. Mittels Heizpatronen wurde eine Werkzeuggrundtemperatur von 180 °C eingestellt. Als Schmierstoff wurde eine Wasser-Grafit-Mischung verwendet, wobei der Anteil 10 vol. % betrug (Carl Bechem GmbH, Typ Berulit 906 HP). Die Durchführung der Serienschmiedeversuche erfolgte vollautomatisiert, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben ist. Alle Stauchbahnen wurden mit 500 Schmiedezyklen belastet. Für die abschließende Verschleißanalytik wurden mit einem 3D-Profilometer (Keyence Deutschland GmbH, Typ VR-3200). Aufnahmen der Werkzeugoberfläche erstellt, die eine Beurteilung des Verschleißverhaltens ermöglichen.

Bild 2: Übersicht unterschiedlich behandelter Stauchbahnen im Ausgangszustand

CHARAKTERISIERUNG DES VERSCHLEISSVERHALTENS STRUKTURIERT DIFFUSIONSBEHANDELTER STAUCHBAHNEN

Die Ergebnisse der Verschleißanalytik von unterschiedlich behandelten Stauchbahnen sind in Bild 3 dargestellt. Allgemein ist festzustellen, dass die Unterwerkzeuge deutlichere Verschleißerscheinungen als die Oberwerkzeuge aufweisen. Als Ursache kommt die Liegezeit des auf 1.000 °C erwärmten und mittig zugeführten Rohteils in Betracht. Die Kontaktzeit mit den Oberwerkzeugen ist deutlich geringer. Bei den rein vergüteten Unterwerkzeugen ist deutlicher abrasiver Verschleiß erkennbar, der sich insbesondere in Form von Riefenbildung zeigt.

Da die Riefen nicht linear verlaufen und sich die Orientierungsrichtung verändert, ist von einer signifikanten negativen Geometrieabweichung auszugehen. Der abrasive Verschleiß tritt im

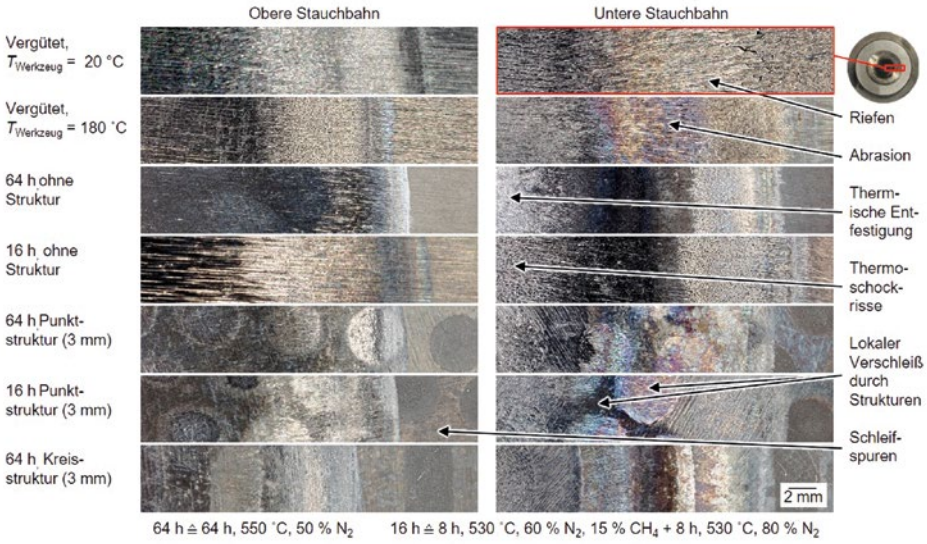


Bild 3: Verschleißanalytik unterschiedlich behandelter Stauchbahnen

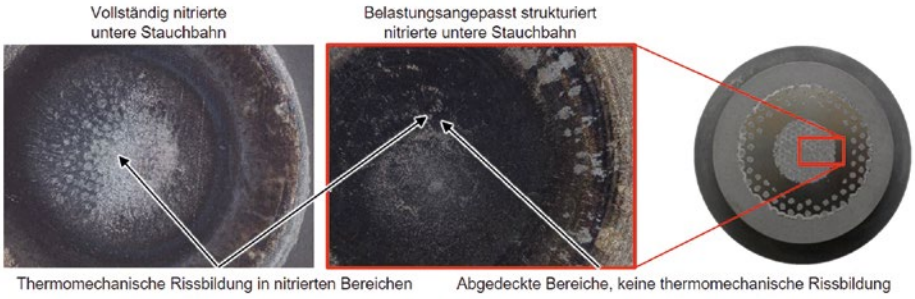


Bild 4: Konzept einer belastungsangepasst strukturierten Diffusionsbehandlung

Bereich und in der Richtung des größten Materialflusses auf, das heißt konzentrisch neben der Rohteilkontaktzone. Weiterhin sind charakteristische Anlassfarben auf der Oberfläche erkennbar, die auf eine hohe thermische Belastung hindeuten. Infolge der Entfestigung wird abrasiver Verschleiß begünstigt, sodass diese Beobachtung mit der verstärkten Riefenbildung im gleichen Bereich korreliert. Bei Stauchbahnen mit der unstrukturierten Kombinationsdiffusionsbehandlung ist mittig ein feines Rissnetzwerk erkennbar.

Dieses Rissnetzwerk ist auf die thermozyklische Wechselbeanspruchung der Stauchbahnmitte zurückzuführen, die aus dem aufliegenden erwärmten Rohteil und der anschließenden Applizierung des Kühlschmierstoffes resultiert. Alle anderen diffusionsbehandelten unteren Stauchbahnen zeigen ebenfalls die Tendenz zur thermomechanisch bedingten Rissbildung, jedoch in geringerem Ausmaß. Als Erklärung kommt eine thermische Stabilisierung durch hohe Stickstoffanteile (60 Prozent N_2 während der Plasmanitrocarburierung und 80 Prozent N_2 bei der nachfolgenden Plasmanitrierung) in Betracht.

Bei den rein vergüteten Stauchbahnen ist keine thermomechanische Rissbildung in der Stauchbahnmitte festzustellen. Allgemein lässt sich ein lokal unterschiedliches Verschleißverhalten bei den strukturiert diffusionsbehandelten Stauchbahnen erkennen. Innerhalb der abgedeckten Punkt- und Linienstrukturen ist erhöhter abrasiver Verschleiß sichtbar, der in diffusionsbehandelten Bereichen abrupt endet. Zusammenfassend weisen abgedeckte beziehungsweise rein vergütete Randzonen ein verbessertes thermomechanisches Rissverhalten auf, allerdings wird die Beständigkeit gegen Abrasion reduziert.

Die lokale Abrasion in abgedeckten beziehungsweise nur vergüteten Bereichen ist kritisch für den Verschleißfortschritt. Alle bisher untersuchten strukturiert diffusionsbehandelten Stauchbahnen weisen die Gemeinsamkeit auf, dass die Strukturen gleichmäßig und in fest definierten Abständen über die gesamte Werkzeugoberfläche vorliegen. Darauf aufbauend wurde das Konzept einer der Werkzeugbelastung angepassten Strukturierung abgeleitet. In der Werkzeugmitte wurden zuvor thermomechanische Rissnetzwerke nachgewiesen und gering ausgeprägte Abrasion. Daher ist ein hoher abgedeckter Oberflächenanteil zielführend, der auf etwa 90 Prozent festgelegt wurde. Weiterhin wurde die Strukturbreite des Punktmusters in der Werkzeugmitte auf 1,5 mm reduziert. Infolge der Umformung des zylindrischen Rohteils und des Materialflusses lag zuvor im angrenzenden konzentrisch strukturierten Bereich abrasiver Verschleiß vor. Dementsprechend wurden die belastungsangepassten Stauchbahnen in diesem Bereich nun vollständig diffusionsbehandelt. Die Strukturierungsbehandlung der Werkzeuge im Ausgangszustand ist in Bild 4 rechts erkennbar.

Weiterhin sind in Bild 4 die Oberflächenaufnahmen einer vollständig und einer belastungsangepasst strukturiert diffusionsbehandelten, unteren Stauchbahn dargestellt. Während bei der vollständig diffusionsbehandelten Stauchbahn (links) der Beginn thermomechanischer Rissbildung zu erkennen ist, weist die belastungsangepasste diffusionsbehandelte

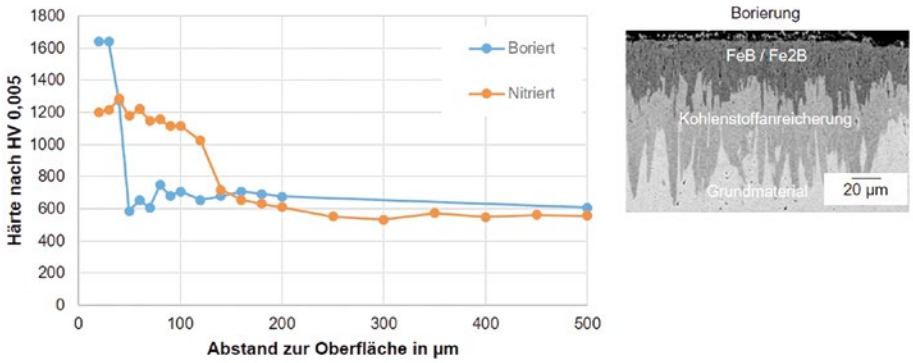


Bild 5: Härtetiefenverläufe einer borierten und nitrierten Randzone

Variante (mittig) keine signifikante Rissbildung auf. Lediglich in den diffusionsbehandelten Zwischenbereichen sind erste thermische Effekte erkennbar. Gleichzeitig liegt ein nahezu identisches abrasives Verschleißverhalten im Bereich des höchsten Materialflusses vor. In diesem Bereich weisen beide Stauchbahnen eine identische vollständige Diffusionsbehandlung auf, sodass keine größeren Unterschiede feststellbar sind. Somit konnte das Verschleißverhalten einer Stauchbahn gegenüber einer vollständig diffusionsbehandelten Variante verbessert werden. Es ist anzumerken, dass durch Strukturvariationen noch weitere Optimierungen erreichbar sind.

WEITERE LÖSUNGSANSÄTZE ZUR REDUZIERUNG DES VERSCHLEISSES VON SCHMIEDEGESENKEN

Die Autoren arbeiten seit vielen Jahren in enger Kooperation zusammen, um neuartige Verschleißschutzmaßnahmen für Schmiedegesenke zu entwickeln. Neben den strukturierten Diffusionsbehandlungen haben sich weitere Lösungskonzepte als erfolgversprechend herausgestellt, die eine Erhöhung und thermische Beständigkeit der Randschichthärte durch alternative Diffusionsprozesse erzielen (IGF-Forschungsprojekt 19553 N).

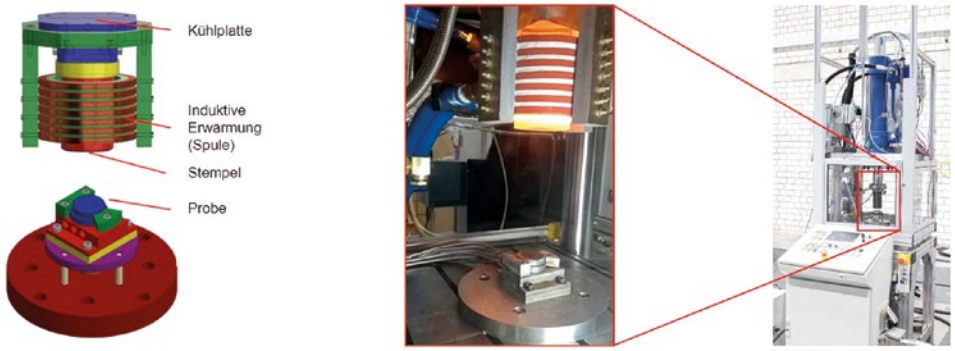


Bild 6: Thermoschockprüfstand zur isolierten Abbildung der thermischen Werkzeugbelastung beim Gesenkschmieden

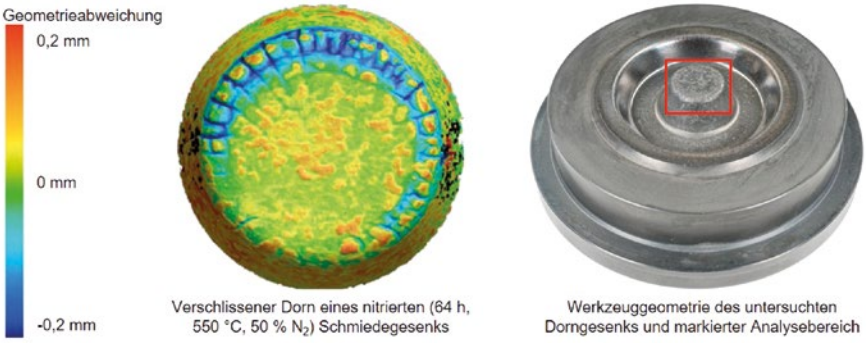


Bild 7: Geometrieabweichungen eines nitrierten (64 h, 550 °C und 50 % N_2) Dorngesenks nach 2.000 Schmiedezyklen
Bilder: Autoren

Beim Plasmaborieren ist die Einstellung einer Randschichthärte von zirka 1.650 HV 0,005 möglich, die oberhalb einer konventionellen Nitrierbehandlung von zirka 1.280 HV 0,005 einzuordnen ist (Bild 5). Das Plasmaborieren wurde in 4 Stunden bei 850 °C durchgeführt, während die Nitrierung in 16 Stunden bei 520 °C erfolgte. Aufgrund der längeren Behandlungsdauer wurde bei der Nitrierbehandlung eine tiefere Diffusionszone erzielt. Die dargestellten Ergebnisse wurden für den Werkstoff 1.2343 ermittelt. Bei der Borierung wurde BCl3 verwendet, wodurch das zur Verfügung gestellte Bor in die Randzone eindiffundiert, sodass eine zweiphasige Boridzone (FeB und Fe2B) entsteht. Die Eisenboride sind Ursache für die hohe Härte der Randzone. Unterhalb der FeB/Fe2B-Phasen liegt eine Kohlenstoffanreicherung vor, die sich auf dem Schliffbild farblich hervorhebt und anhand von EDX-Analysen nachweisbar ist. Infolge der hohen Prozesstemperaturen entfestigt das Werkzeug, sodass borierte Werkzeuge nachvergütet werden müssen. Aufgrund der hohen Härte nimmt die Duktilität der Randschicht ab, jedoch weisen borierte Randzonen eine hohe thermische Stabilität auf und sind im Vergleich zu nitrierten Randzonen beständiger gegenüber thermomechanischer Rissbildung. An dieser Stelle könnte eine strukturierte Borierung das thermomechanische Rissverhalten zusätzlich verbessern, um die positiven Eigenschaften einer harten und gleichzeitig duktilen Oberfläche zu vereinen.

ZUSAMMENFASSUNG

Mittels Folienabdeckung und Airbrush-Technik kann diffusionshemmende Abdeckpaste auf Werkzeuge der Warmmassivumformung strukturiert aufgetragen werden, sodass belastungsangepasste Diffusionsbehandlungen realisierbar sind. Die nebeneinander angeordneten duktilen und diffusionsbehandelten Randzonen beeinflussen das Verschleißverhalten. An ebenen Stauchbahnen wurde eine Verbesserung des thermomechanischen Rissverhaltens nachgewiesen. Gleichzeitig weisen abgedeckte Bereiche eine reduzierte Beständigkeit gegenüber Abrasion auf. Zur zielführenden Anwendung strukturierter Diffusionsbehandlungen ist eine genaue Kenntnis der Werkzeugbelastungen und des Verschleißverhaltens erforderlich, damit die Strukturen dem jeweiligen Schmiedeprozess angepasst werden können. Das thermomechanische Rissverhalten kann insbesondere in Werkzeugbereichen wie zum Beispiel der Stauchbahnmitte verbessert werden, wo hohe thermische Belastungen und geringer abrasiver Verschleiß vorliegen. Grundsätzlich kann die Beständigkeit gegenüber Thermoschockrissen auch in abrasiv beanspruchten Bereichen verbessert werden, aber ist aufgrund des erhöhten Materialabtrags nicht empfehlenswert.

AUSBLICK

Im Rahmen des IGF-Forschungsprojektes 19302 N wurde am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen ein neuartiger Prüfstand entwickelt, mit dem eine isolierte Abbildung der thermischen Werkzeugbelastung beim Gesenkschmieden dargestellt werden kann (Bild 6). Über eine Induktionsspule wird der Stempel erwärmt, der das erwärmte Rohteil repräsentiert. Der Stempel wird hydraulisch auf eine das Schmiedegesenk darstellende Probenoberfläche gefahren. Die Belastung der eingespannten Probe kann entsprechend den Bedingungen eines realen Schmiedeprozesses in Bezug auf Taktzeit, Druckberührzeit, Normalkraft et cetera eingestellt werden. Zwischen den jeweiligen Belastungszyklen wird über eine pneumatische Vorrichtung Wasser appliziert und damit die thermozyklische Wechselbeanspruchung beim Gesenkschmieden modelliert. In nachfolgenden Arbeiten wird der Prüfstand weiter modifiziert um strukturierte und unstrukturierte Diffusionsbehandlungen in größerem Umfang mit dem neuartigen Prüfstand auf ihre Thermoschockbeständigkeit zu untersuchen.

Weiterhin wurden die strukturierten Diffusionsbehandlungen in realen Serienschmiedeprozessen erprobt, und es ist geplant, die Ergebnisse im Rahmen weiterer Studien zu publizieren. Rechts in Bild 7 ist ein nitriertes (64 Stunden, 550 °C und 50 Prozent N_2) Dorngesenk aus dem IGF-Forschungsprojekt 19302 N dargestellt, das geometriebedingt am Dornradius einer hohen thermischen Beanspruchung ausgesetzt wird und daher für die Untersuchungen gut geeignet ist. Anhand der Geometrieabweichung vom Ausgangszustand und nach 2.000 Schmiedezyklen wird deutlich, dass am Dorn ausgeprägte thermomechanische Rissbildung vorliegt. Die negative Geometrieabweichung am Radius deutet auf Materialausbrüche hin, die von der thermomechanischen Rissbildung initiiert werden. Für diesen Fall ist die strukturierte Diffusionsbehandlung zielführend, da ansonsten keine ausgeprägte Abrasion erkennbar ist.

Die IGF-Vorhaben 19529 N, 19302 N und 19553 N der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e. V. (FGW), Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid, wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung der Abschlussberichte kann bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe, Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, angefordert werden.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

AiF Forschungsnetzwerk Mittelstand

[1] Herlan, T.: Optimaler Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung. 1. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 2013

[2] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4 – Umformen. 6. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 2017

[3] Knoerr, M.: Auslegung von Massivumformwerkzeugen gegen Versagen durch Ermüdung. 1. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 1996

[4] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen. 2. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 2010

[5] Bach, F.-W.; Kerber, K.: Prozesskette Präzisionsschmieden. 1. Auflage; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 2013