

Tribologische Systeme für die Kaltmassivumformung rostfreier Stähle



Rostfreie Stähle sind aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit und hohen Festigkeit besonders interessant für die Erschließung neuer Märkte. Die Kaltmassivumformung dieser Stähle geht jedoch mit höheren tribologischen Belastungen in Form von Kontaktnormalspannungen und auftretenden Temperaturen einher. Durch neue Verordnungen zum Schutz der Umwelt, wie REACH der EU-Kommission, ist es wünschenswert, die üblicherweise verwendeten oxalatbasierten Schmierstoffsysteme durch ökologisch vorteilhafte Einschichtschmierstoffe zu substituieren. Die folgenden Untersuchungen charakterisieren die Leistungsfähigkeit der Einschichtschmierstoffe und ermitteln die Grenzen bei der Umformung rostfreier Stähle.

AUTOREN

**Patrick Volke, M. Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche**

leitet das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt

Kaltmassivumformprozesse vereinen in der Massenproduktion wirtschaftliche und technologische Vorteile gegenüber konkurrierenden Fertigungsverfahren. Kaltmassivumgeformte Komponenten weisen zudem gegenüber spanend hergestellten Bauteilen vorteilhafte mechanische Eigenschaften auf [1]. Neben der hohen Produktivität und einer hohen Werkstoffausnutzung können einbaufertige Oberflächen erreicht werden [2].

Diesen Vorteilen in der Anwendung stehen jedoch Nachteile in der Fertigung gegenüber, insbesondere der große Kraft- und Energiebedarf sowie das begrenzte Formänderungsvermögen einiger Ausgangswerkstoffe. In den meisten Fällen werden un- oder niedriglegierte Stähle mit Prozessen der Kaltmassivumformung verarbeitet. Höherfeste, korrosionsbeständige Stähle erlauben einen vielfältigen Einsatz der Bauteile und können ohne eine nachgelagerte Oberflächenbehandlung vielfältig eingesetzt werden. Hierdurch ist der Einsatz der Bauteile in der Lebensmittelverarbeitung, der Medizintechnik oder der chemischen Verfahrenstechnik möglich. Die Korrosionsbeständigkeit kann auch zur Erhöhung der Lebensdauer genutzt werden. Zudem ist keine Wärmebehandlung zur Festigkeitssteigerung notwendig, wodurch Verzug vermieden wird [3].

Aufgrund der höheren Festigkeit des Werkstoffs und der schlechteren Wärmeleitfähigkeit steigen die tribologischen Lasten (vor allem Kontaktnormalspannungen und Temperaturen) gegenüber un- oder niedriglegierten Stählen in der Kontaktzone deutlich an. Dies erfordert aktuell den Einsatz von Schmierstoffsystemen mit

Konversionsschichten auf Oxalat-Basis. Bedingt durch die von der EU-Kommission eingeführte europäische Chemikalienverordnung REACH [4] und die Forderung nach einem geringeren Energie- und Ressourcenverbrauch wird der Einsatz alternativer und ökologisch vorteilhafter Einschichtschmierstoffsysteme erforderlich.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ist die Charakterisierung der Leistungsfähigkeit der Einschichtschmierstoffe und die Ermittlung der Grenzen bei der Umformung rostfreier Stähle. Dies erfolgt in vier Schritten. Nach der Auswahl der Musterprozesse werden die tribologischen Lasten mittels numerischer Simulationen ermittelt. Auf dieser Basis erfolgt die Nachbildung der Lasten und Charakterisierung der Schmierstoffe in Tribometeruntersuchungen. Abschließend werden die erfolversprechendsten Schmierstoffe in Realversuchen erprobt.

Bild 1 zeigt die für diese Untersuchung gewählten Musterprozesse. Um einen weiten Bereich an tribologischen Lasten abzudecken, werden neben dem Umformverfahren auch die Werkstoffe sowie Bauteilabmessungen variiert. Als Umformverfahren kommen ein Vollvorwärts-, ein Napfrückwärts-Fließpressen und ein kombiniertes Fließpressen zum Einsatz. Das untersuchte Werkstoffspektrum besteht aus einem austenitischen Stahl (1.4567) und einem martensitischen Stahl (1.4006). Bei den Bauteilabmessungen werden die Durchmesser von 9 bis 35 mm abgedeckt.

	Kombiniertes-Fließpressen	Napfrückwärts-Fließpressen	Vollvorwärts-Fließpressen
Material	Martensitischer Stahl 1.4008	Austenitischer Stahl 1.4587	Austenitischer Stahl 1.4587
Abmessungen	Ø 35 mm x 64 mm	Ø 18 mm x 32 mm	Ø 9 mm x 44 mm



Bild 1: Musterprozesse

Zur Nachbildung der tribologischen Lasten wird als Tribometer der Gleitstauchversuch verwendet, welcher speziell für die Lasten der Massivumformung entwickelt wurde [5]. Der Versuchsablauf des Tribometers ist in Bild 2 dargestellt. Die zylindrische Probe, die mit dem zu untersuchenden Schmierstoff beschichtet ist, wird auf der Gleitplatte positioniert. Die Gleitplatte bildet die Werkzeugoberfläche nach, sie ist gehärtet und poliert. Die Gleitplatte und der Stempel bilden zusammen das Werkzeug. Im ersten Schritt staucht der Stempel die Probe mit einer vorgegebenen Kraft. Beim Stauchen werden die für die Untersuchung vorgesehenen Oberflächenvergrößerungen und Kontaktnormalspannungen eingestellt. Im zweiten Schritt erfolgt unter Aufrechterhaltung der Stauchkraft die Relativbewegung zwischen den Reibpartnern, indem die Gleitplatte unter der Probe verfährt. Durch die Aufzeichnung der Stauchkraft sowie der Kraft, die benötigt wird, um die Platte zu verfahren, kann der Reibkoeffizient nach dem Coulombschen Reibgesetz über den gesamten Gleitweg bestimmt werden.

Acht Schmierstoffsysteme kommen in der Untersuchung zum Einsatz: Drei der Systeme basieren auf der Verwendung einer Oxalatschicht in Kombination mit den Schmierstoffen Chlorparafin, Molybdändisulfid (MoS_2) und Polymer. Die eingesetzten fünf Einschichtschmierstoffsysteme werden auf Basis von Polymer, MoS_2 sowie Salz-Wachs mit integrierter Schmierung eingesetzt.

Insgesamt werden sieben Lastvarianten mit je drei Wiederholungen im Gleitstauchversuch nachgebildet. Die Varianten stellen eine Kombination aus den Lastkollektiven Kontaktdruck, Oberflächenvergrößerung, Kontakttemperatur und Gleitgeschwindigkeit dar und orientieren sich an den tribologischen Lasten der Musterprozesse. Die Parameter sind in Bild 3 dargestellt.

Der untere Teil des Bilds stellt die Ergebnisse der Tribometeruntersuchungen dar. Die Symbole zeigen dabei die Anzahl der erfolgreich durchgeführten Versuchswiederholungen bei der jeweiligen Lastvariante. Ein Versuch gilt als bestanden, wenn alle drei Wiederholungen ohne ein Schmierstoffversagen und daraus resultierendem Abbruch des Versuchs durchlaufen werden.

Ein Schmierstoffsystem hat versagt, wenn es bereits beim ersten Durchlauf zu einem Schmierstoffversagen mit Abbruch des Versuchs kommt. Bei Lastvariante 1, die die geringsten tribologischen Lasten abbildet, versagte während der drei Versuchsdurchläufe die Schmierstoffschicht bei drei der acht Schmierstoffsysteme. Das Versagen führt zu einem adhäsiven Verschleiß der Probe. Bei steigenden Lasten zeigt sich, dass die Schmierstoffsysteme mit einer Konversionsschicht aus Oxalat den Einschichtschmierstoffen überlegen sind. Von den Einschichtschmierstoffen ist das Polymer_1 am leistungs-

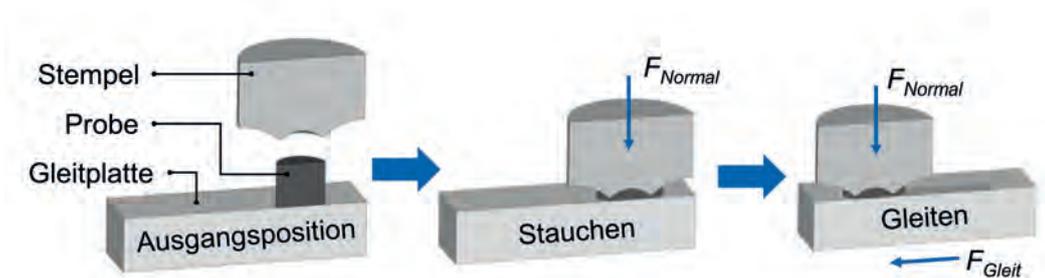


Bild 2: Schematischer Ablauf des Gleitstauchversuchs nach [5]

Parameter Gleitstauchversuch							
Variante	1	2	3	4	5	6	7
Kontaktdruck [MPa]	1.800	1.800	1.800	1.800	2.500	2.500	2.500
Oberflächenvergrößerung [-]	4,3	4,3	6,7	6,7	18	18	18
Kontakttemperatur [°C]	164	256	216	340	211	320	274
Werkzeugtemperatur [°C]	22	22	150	150	22	22	22
Gleitgeschwindigkeit [mm/s]	20	120	20	120	20	120	120
Schmierstoffsystem							
Oxalat + Chlorparafin	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Oxalat + MoS ₂	✓	✓	✓	✓	~	✗	-
Oxalat + Polymer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Polymer_1	✓	✓	✓	✗	✓	~	✓
Polymer_2	~	~	✗	✗	✗	✗	-
MoS ₂ _1	~	~	✗	✗	✗	✗	-
MoS ₂ _2	✓	✓	~	✗	✗	✗	-
Salz-Wachs	~	~	~	✗	✗	✗	-
Erfolgreiche Versuchsdurchläufe:	✓ 3/3	~ 1/3 2/3	✗ 0/3				

Bild 3: Tribologische Lasten sowie Ergebnisse der Tribometeruntersuchungen

stärksten und stellt eine Alternative für die Systeme mit einer Oxalat-Konversionsschicht dar. Der Schmierstoff kann die Lastvarianten 5 und 6 mit Kontaktdrücken von 2.500 MPa und Oberflächenvergrößerungen von 18 erfolgreich durchführen. Die Kontakttemperatur stellt bei diesem Schmierstoffsystem den limitierenden Faktor dar. Die bei Lastvariante 4 auftretenden Temperaturen von 340 °C sind zu hoch, und es kommt zum Versagen. Lastvariante 6 liegt mit einer Kontakttemperatur von 320 °C im Grenzbereich, wodurch die Wiederholungen teilweise durchgeführt werden können. Durch eine Pause zwischen Stauchen und Gleiten und eine resultierende Reduzierung der Kontakttemperatur auf 274 °C bei Lastvariante 7 sind die Versuchswiederholungen wieder erfolgreich. Die Einschichtschmierstoffe auf MoS₂-Basis zeigen eine starke Abhängigkeit von der auftretenden Oberflächenvergrößerung. Die Steigerung der Oberflächenvergrößerung von 4,3 auf 6,7 führt bei beiden Schmierstoffen zu einer Verschlechterung ihrer Leistungsfähigkeit. Dieser Effekt ist auch mit einer zusätzlichen Konversionsschicht zu beobachten.

Im Anschluss an die Tribometeruntersuchungen wird eine Auswahl der Einschichtschmierstoffsysteme in realen Fließpressversuchen sowohl im Labor als auch im Industriemaßstab validiert. Im Labormaßstab werden die Versuche der drei Musterprozesse auf der institutseigenen Servomotorpresse durchgeführt. Dabei kommen Umformgeschwindigkeiten zwischen

22 mm/s und 170 mm/s zum Einsatz. Zusätzlich wird die Matrize beim Vollvorwärts-Fließpressen nicht nur bei Raumtemperatur, sondern auch bei 100 °C und 150 °C genutzt. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Die Versuche des Vollvorwärts-Fließpressens sind mit zwei der vier Schmierstoffe ohne Verschleißerscheinungen erfolgreich. Bei den Schmierstoffen Polymer/MoS₂_1 und Polymer/MoS₂_2 ist eine Umformung möglich, es sind jedoch deutliche abrasive Verschleißerscheinungen auf den Proben zu erkennen, die über die Wiederholungen vermehrt aufgetreten sind. Bei den beiden Schmierstoffen MoS₂_1 und Polymer_1 ließen sich alle Parametervariationen ohne Verschleißerscheinungen und Schmierstoffversagen erfolgreich durchführen. Die Werkzeugtemperatur hat auf beide Schmierstoffe einen signifikanten Einfluss. Bild 4, links zeigt die Kraft-Weg-Verläufe für die beiden Schmierstoffe MoS₂_1 und Polymer_1 bei Werkzeugtemperaturen von 25, 100 und 150 °C. Beim Polymer-Schmierstoff sinkt die Umformkraft bei einer Werkzeugtemperatur von 150 °C um 50 Prozent im Vergleich zur Raumtemperatur. Die Kraftreduktion ist mit 25 Prozent beim MoS₂-Schmierstoff etwas schwächer ausgeprägt. Eine Erklärung hierfür kann das Temperatur-Viskose-Verhalten der Schmierstoffe sein. Aufgrund der Werkzeugtemperaturen von 100 °C und 150 °C hat der Schmierstoff direkt zu Beginn der Umformung eine niedrigere Viskosität, die dem Schmierstoff unter anderem

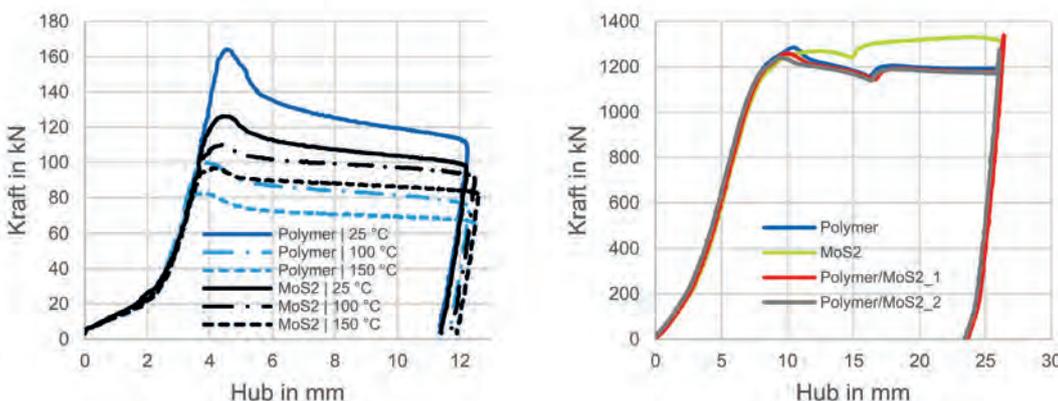


Bild 4: Kraft/Weg-Verlauf vom Vollvorwärts-Fließpressen (links) und kombinierten Fließpressen (rechts) Bilder: Autoren

seine Reibeigenschaften gibt. Bei Raumtemperatur wird diese Viskosität erst später erreicht, wenn der Schmierstoff durch die Umformenergie erwärmt wird.

Die Versuche beim Napfrückwärts-Fließpressen und beim kombinierten Fließpressen sind mit allen Schmierstoffen möglich, ohne dass Verschleißerscheinungen auftreten. Beim kombinierten Fließpressen ist aufgrund des höheren Reibkoeffizienten des MoS₂-Schmierstoffs im Vergleich zu den drei Polymer-Schmierstoffen die Umformkraft höher, zusätzlich ändert sich der Ablauf der Umformung (Bild 4, rechts). Der Knick im Kraftverlauf entsteht, wenn die Umformung des Zapfens beim Vollvorwärts-Fließpressen abgeschlossen ist und nur noch der Napf ausgeformt wird. Die höhere Reibung verhindert zu Beginn die Umformung des Napfs, wodurch der Zapfen beim MoS₂-1 bereits früher ausgeformt ist.

In den Laborversuchen sind insgesamt knapp 80 Bauteile pro Werkzeug umgeformt worden. Um das Verschleißverhalten und die Leistungsfähigkeit der Einschichtschmierstoffe auch in einem größeren Maßstab zu beurteilen, wurden abschließend Versuche bei einem Projektpartner durchgeführt. Für die Versuche kamen der Prozess des kombinierten Fließpressens sowie die beiden Einschichtschmierstoffe Polymer_1 und MoS₂-1 zum Einsatz. Insgesamt werden bei den Versuchen 1.743 Proben mit einem Werkzeugsatz umgeformt. Alle Proben konnten ohne erkennbaren Verschleiß am Werkzeug umgeformt werden. Ebenso wie bei den Laboruntersuchungen ist die Umformkraft bei dem Polymer-Schmierstoff tendenziell geringer als bei dem Schmierstoff auf MoS₂-Basis.



- [1] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4; Umformen, Springer Berlin, Berlin, s.l. 2017
- [2] Kappes B.: Über den Nachweis tribologischer Effekte mit Hilfe von Modellversuchen im Bereich der umweltfreundlichen Kaltmassivumformung, Shaker, Aachen, 2005
- [3] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei: Edelstahl Rostfrei-Eigenschaften, Merkblatt 821, 2015
- [4] European Parliament and Council: REACH, Regulation No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council
- [5] Groche, P; Stahlmann, J; Müller, C.: Mechanical conditions in bulk metal forming tribometers – Part two, in: Tribology International 66 (2013), pp. 345 – 351

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Untersuchung konnte die Machbarkeit der konversionsschichtfreien Kaltmassivumformung rostfreier Stähle nachgewiesen werden. Hinsichtlich der Charakterisierung der Schmierstoffsysteme zeigte sich, dass die Systeme mit Oxalatbeschichtung im Vergleich zu den Einschichtschmierstoffen noch leistungsstärker sind, dass aber einzelne Einschichtschmierstoffe durchaus nahezu ebenbürtig sind. Die Leistungsgrenzen sind bei den Schmierstoffklassen unterschiedlich ausgeprägt. Die Leistungsfähigkeit der Polymer-schmierstoffe und der Salz-Wachse hängt signifikant von der Kontakttemperatur ab. So führen Temperaturen über einem kritischen Punkt zum Versagen, auch wenn die anderen tribologischen Lasten eher moderat sind. Bei der Klasse der MoS₂-Schmierstoffe ist die Oberflächenvergrößerung ein kritischer Faktor.

Insgesamt besitzen Einschichtschmierstoffe eine ausreichende Leistungsfähigkeit für die in der Kaltmassivumformung rostfreier Stähle auftretenden Lasten. Die genannten Schwächen der Schmierstoffe müssen für den jeweiligen Prozess jedoch einzeln bewertet werden. Durch die Versuche im industriellen Umfeld konnte gezeigt werden, dass mit den Systemen der Einschichtschmierstoffe die Umformung einer größeren Anzahl von Bauteilen ohne Verschleißerscheinungen möglich ist.



Das IGF-Vorhaben 19803 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses
des deutschen Bundestages