

Herausforderungen bei der Entwicklung einer Umformtechnologie

Kaltumformung von metastabilem Cr-Ni-Cu-Stahlguss

N. Lehnert, J. Steger, P. Nitzsche, M. Wendler, V. Kräusel

Angesichts der aktuellen Energiepreisentwicklung ist die Gestaltung effizienter Fertigungsstrategien unabdingbar. Die Anwendung von Verfahren der Kaltumformung in Kombination mit metastabilen austenitischen Cr-Ni-Cu-Stahlgusswerkstoffen kann zur wirtschaftlichen Fertigung von Konstruktionselementen des Maschinenbaus beitragen.

STICHWÖRTER

Umformtechnik, Finite-Elemente-Methode (FEM), Gießen

Cold forming of metastable Cr-Ni-Cu cast steel - Challenges in developing a forming technology

The current energy price development calls for the design of efficient manufacturing strategies. The use of cold forming processes in combination with metastable austenitic Cr-Ni-Cu cast steel materials contributes to the economical production of structural elements in mechanical engineering.

1 Einführung

Neue Entwicklungen im Bereich der Werkstoffe ziehen stets Weiterentwicklungen im Fertigungsablauf nach sich. So auch bei den austenitischen Cr-Ni-Stählen. Mit deren Markteinführung zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann ein kontinuierlicher und fortwährender Entwicklungsprozess zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften derartiger Legierungen. Die Kombination werkstoffspezifischer Verarbeitungstechnologie mit einem neuartigen Legierungskonzept, in dem das teure Legierungselement Nickel teilweise durch Kupfer substituiert wird, erlaubt es, Formteile zu fertigen, die höchsten Qualitätsansprüchen genügen.

2 Metastabiler austenitischer Stahlguss

Austenitische rostfreie Stähle sind seit vielen Jahrzehnten ein Forschungsschwerpunkt der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Mit der Entwicklung von hochfestem und zähem Stahlguss mit TRIP/TWIP-Eigenschaften (TRIP = TRansformation Induced Plasticity, TWIP = TWinning Induced Plasticity) erhielt die Forschung eine neue Ausrichtung [1–3].

Kennzeichnend für den untersuchten austenitischen Stahlguss mit TRIP/TWIP-Effekt ist, dass sich zusätzlich zu einer ausgeprägten planaren Versetzungsgleitung im Austenit Verformungsmartensit beziehungsweise Verformungszwillinge während einer äußeren Beanspruchung bilden. Dadurch können die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von Umformtemperatur und -geschwindigkeit erhöht werden. Aus diesem Grund besitzt der Stahlguss trotz seines grob-dendritischen Gefüges ein ausgezeichnetes Kaltumform- und damit auch Energieabsorptionsvermögen. In **Bild 1** ist exemplarisch das grob-dendritische Stahlgussgefüge dargestellt.

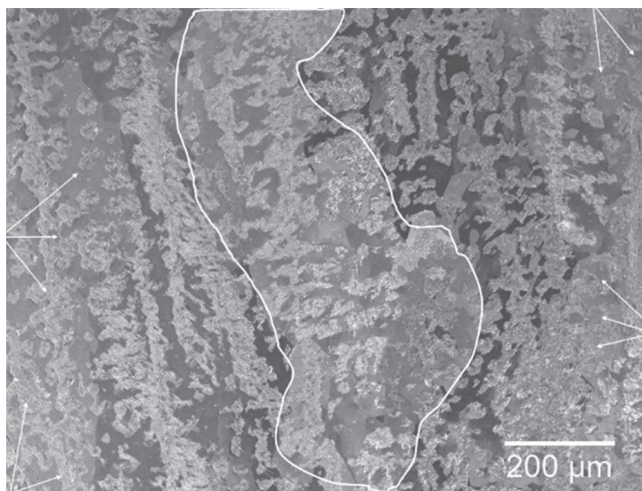


Bild 1. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme im BSE (backscattered electrons)-Kontrast über das grobkörnige, dendritische Ausgangsgefüge nach der Erstarrung. Foto: TU Bergakademie Freiberg

Aufgrund der Metastabilität des Austenits konnte die präparationsinduzierte Martensitbildung auf der Probenoberfläche nicht vermieden werden. Dieser sogenannte Schleifmartensit (durch Pfeile gekennzeichnet) bildet sich bevorzugt in den Dendritenzentren aus. Die interdendritischen Räume werden während der Erstarrung mit den Hauptlegierungselementen Cr, Ni und Cu angereichert und verbleiben austenitisch [4]. Da es sich um ein Gussgefüge handelt, liegt die Korngröße des Austenits, wie in Bild 1 ersichtlich, bei mehreren 100 µm.

Während bei herkömmlichem Stahlguss auftretende Spannungsspitzen mit Beginn der Einschnürung zum Bruch führen können, erfolgt bei dem untersuchten Material die Bildung von Verformungsmartensit. Infolgedessen verfestigt der Stahlguss an

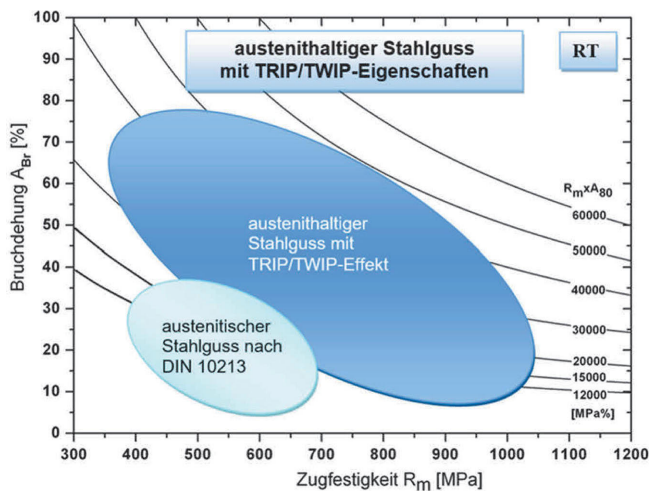


Bild 2. Potenzial von austenithaltigem Stahlguss mit TRIP/TWIP (TRansformation Induced Plasticity/ TWinning Induced Plasticity)-Effekt gegenüber konventionellem austenitischem Stahlguss. Grafik: [5]

exakt dieser Stelle und ist somit in der Lage, höhere Spannungen beim Fortgang der Umformung aufzunehmen. **Bild 2** verdeutlicht in einem Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Diagramm die Eigenschaftspotenziale bei Raumtemperatur für konventionellen austenitischen Stahlguss nach DIN EN 10213 und austenithaltigen Stahlguss mit TRIP/TWIP-Effekt.

3 Kaltumformtechnologien

Im Fokus der Untersuchungen stand die Fertigung von geometrisch einfachen rotationssymmetrischen Bauteilen durch verschiedene Verfahren der Kaltmassivumformung. Bisher wurde die Festigkeitssteigerung von austenitischen Stahlgusslegierungen mittels Kaltumformung nicht praktiziert. Bedingt durch ein dendritisches Gussgefüge, Steigerungen sowie eine gewisse Porosität können konventionelle Stahlgusslegierungen nicht kalt umgeformt werden. Demgegenüber stehen die Forschungsergebnisse der Technischen Universität Bergakademie Freiberg im Sonderforschungsbereich 799 „TRIP-Matrix-Composite“. Hier wurden austenitische Stähle mit TRIP/TWIP-Eigenschaften hergestellt und erforscht, welche sich kalt – im Gusszustand – umformen lassen [5].

Um die Grenzen des Kaltumformvermögens der im Fokus stehenden Stahlgusslegierung (metastabiler austenitischer Cr-Ni-Cu-Stahlguss: X3CrNiCuN17-6-4) auszuloten, wurden am Fraunhofer IWU in Chemnitz Versuche mittels Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP) und Querkeilwalzen durchgeführt. Deren chemische Zusammensetzung ist in **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung des untersuchten Stahlgusses in Ma.-%.

	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	C	N	Fe
X3CrNiCuN17-6-4	16.6	5.96	4.27	0.35	0.34	0.02	0.17	Rest

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des Ersatzwerkstoffs in Ma.-%.

	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	C	N	Fe
X3CrNiCu18-9-4	17.8	8.5	4.0	1.0	2.0	0.04	0.1	Rest

Die Wahl der Umformverfahren basiert auf deren unterschiedlichen Charakteristiken in Bezug auf den Werkstofffluss. Ziel war es, den genauen Zusammenhang zwischen Umformtechnologie und Kaltumformbarkeit des Werkstoffs zu identifizieren. Laut DIN 8583 gehören beide Verfahren zur Gruppe der Druckumformverfahren. Beim Fließpressen erfolgt zunächst eine axiale Stauchung, was zu Druckspannungen im umzuformenden Werkstoff führt. Beim Querwalzen erfahren hingegen nur die äußeren Bereiche des umzuformenden Rohlings eine Druckbeanspruchung. Der Kernbereich ist durch eine ununterbrochene Schubformänderung gekennzeichnet. Dabei ändert sich die Richtung der Verschiebung entsprechend der Rotation des Werkstückes fortwährend. In den Querrichtungen, vom Kern ausgehend, wirken zudem Zugspannungen [6, 7].

Zur Verdeutlichung der Komplexität der Kaltumformung von Stahlguss wurden zunächst FE (Finite Elemente)-Simulationen der beiden Umformtechnologien durchgeführt. Für die ersten Berechnungen wurde ein Materialersatzmodell (X3CrNiCu18-9-4) mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung und Werkstoffeigenschaften genutzt (**Tabelle 2**).

Die Unterschiede der jeweiligen Prozesscharakteristik bezüglich der Spannungsverteilung im Bauteil verdeutlicht **Bild 3**. Durch eine erste FE-Modellierung konnten die unterschiedlichen Spannungszustände nachgewiesen werden. Die blauen Bereiche zeigen demnach Druckspannungen und die roten Zugspannungen.

Austenitische Cr-Ni-Stähle verfestigen nicht nur durch die Martensitbildung stark bei der Umformung, sondern auch durch eine entsprechende Kaltverfestigung des Austenits. Untersuchungen von Hauser *et al.* [7] an einer Cr-Ni-Cu-Stahlgusslegierung zeigten, dass Druckspannungen bis zu 1400 MPa in Abhängigkeit von der Dehnrate und der Umformtemperatur auftreten können. Diese hohe Umformfestigkeit des Versuchswerkstoffs muss bei der Auslegung der entsprechenden Umformwerkzeuge berücksichtigt werden.

Das Ausgangsmaterial für die Umformversuche wurde fallend in Kupferkokillen abgegossen. Die so hergestellten Stangenabschnitte hatten einen Durchmesser von 30 mm und eine Länge von 475 mm. In **Bild 4** sind die verschiedenen Fertigungsstufen der Proben für das Fließpressen gegenübergestellt.

Bedingt durch die zu erwartenden hohen Kontaktspannungen zwischen Werkzeug und Werkstück, wurde am Fraunhofer IWU ein zweifach armiertes Werkzeugkonzept entwickelt und konstruktiv umgesetzt. In **Bild 5** ist schematisch das genutzte Voll-Vorwärts-Fließpresswerkzeug, inklusive Armierungsverband, in Einbausituation dargestellt.

Als Umformaggregat kam eine hydraulische Einständerpresse mit einer maximalen Presskraft von 2500 kN zum Einsatz. Im

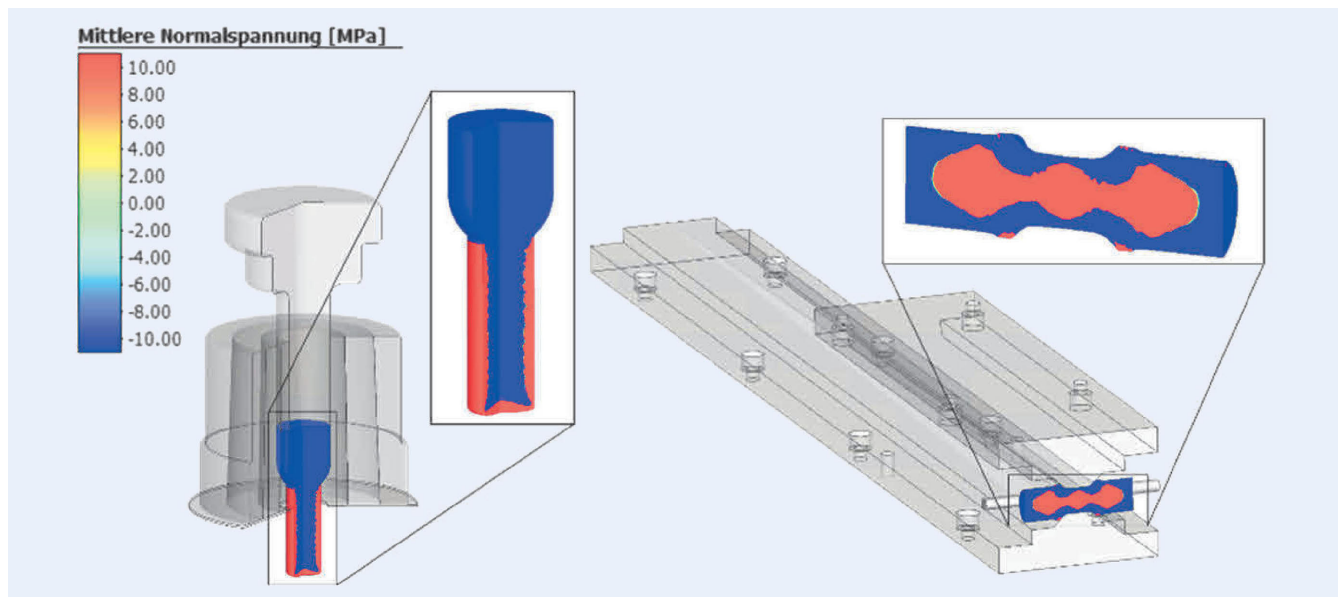


Bild 3. Spannungsverteilung (Zug- und Druckspannungen) beim Voll-Vorwärts-Fließpressen (links) und beim Querkeilwalzen (rechts). Grafik: Fraunhofer IWU

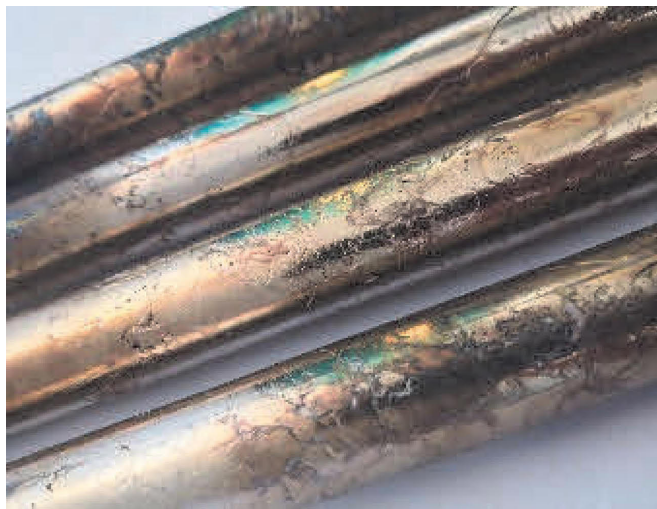


Bild 4. Ausgangsmaterial für die Kaltumformung. Links: gegossenes Stangenmaterial, rechts: Proben nach der spanenden Bearbeitung. Foto: Fraunhofer IWU

Gegensatz zu einem konventionellen Fließpressprozess wurde ohne Auswerfer gearbeitet. Um einen durchgängig reduzierten Stab für sich anschließende Werkstoffuntersuchungen zu erzeugen, wurde ein zweites Bauteil zum Durchdrücken der Probe durch die Fließpressmatrize verwendet. Die Reduktion erfolgte einstufig von einem Anfangsdurchmesser \varnothing 26 mm auf einen Enddurchmesser \varnothing 16,5 mm.

Ergänzend zum Voll-Vorwärts-Fließpressen erfolgten Versuche mittels Querkeilwalzen. Charakteristisch für diesen Prozess ist, dass keilförmige Werkzeuge gegenläufig in das Werkstück eindringen und somit ein im Querschnitt reduziertes rotations-symmetrisches Werkstück erzeugen. Für die Versuche wurde eine Flachbacken-Querwalzmaschine der Firma Bêché mit einer tangentialen Walzkraft von 315 kN genutzt.

Wie Hauser *et al.* [7] zeigen, liegt im untersuchten Stahlguss eine Temperaturanomalie bei den Umformeigenschaften vor. Charakteristisch für die im Fokus stehende austenitische Stahlgusslegierung mit TRIP/TWIP-Effekt ist ein Temperaturbereich mit erhöhtem Kaltumformvermögen. Damit im Zusammenhang

steht die Gefügeumwandlung von Austenit zu Martensit. Anhand von Zugversuchen im Temperaturbereich von -60°C bis 200°C konnte die Bildung des temperaturabhängigen dehnungsinduzierten Martensits nachgewiesen werden. Bei einer Temperatur von -60°C konnte die höchste wahre Spannung von 1494 MPa gemessen werden. Mit dem MSAT-Messgerät konnte hier ein Martensitanteil von 76 Vol.-% nachgewiesen werden. Schlussendlich ergaben die Untersuchungen einen Bereich der dehnungsinduzierten Martensitbildung von -60°C bis 140°C . Oberhalb dieser sogenannten „Md-Temperatur“ wurde die Bildung von Martensit vollständig unterdrückt. Mit dem Wissen über diese Temperaturanomalie stand bei der Ergebnisauswertung der FE-Simulationen vor allem die Temperaturentwicklung (**Bild 6**) während der Umformung im Mittelpunkt.

Da bei Umformprozessen die Umformenergie zu 95 % in Wärme umgewandelt wird, lag der Schwerpunkt der Prozessauslegung vor allem darauf, möglichst viel Umformwärme ins Werkzeug abzuführen. Beim VVFP wurden Temperaturen im Randbereich der Probe von bis zu 200°C ermittelt. Beim Querkeilwalzen

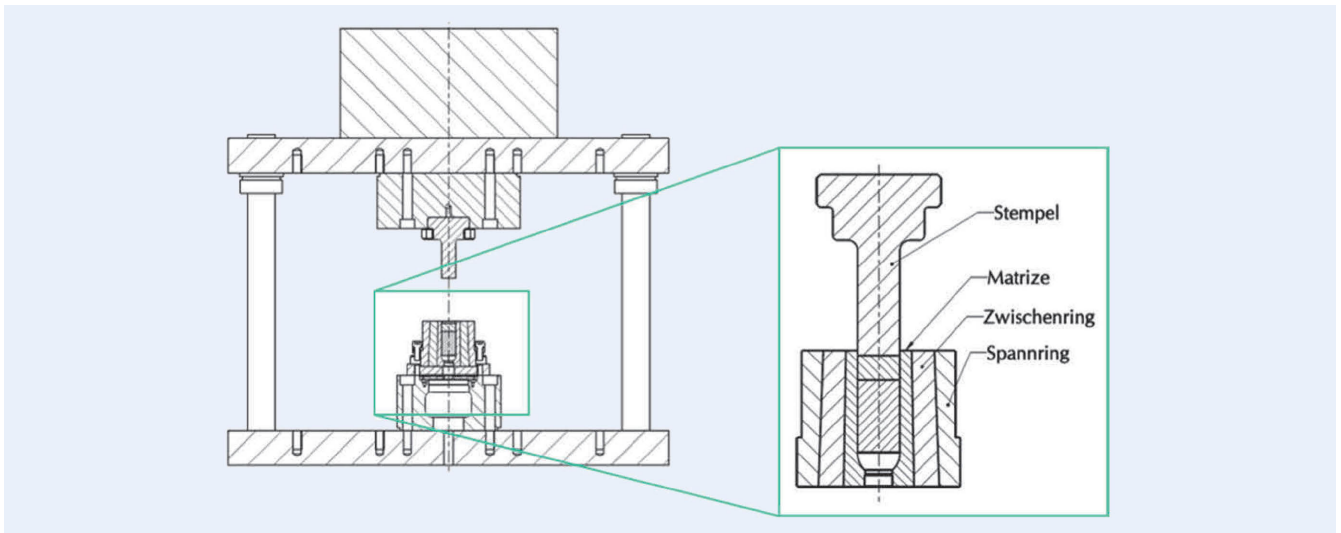


Bild 5. Schematische Darstellung des Werkzeuges zum Voll-Vorwärts-Fließpressen. Grafik: Fraunhofer IWU

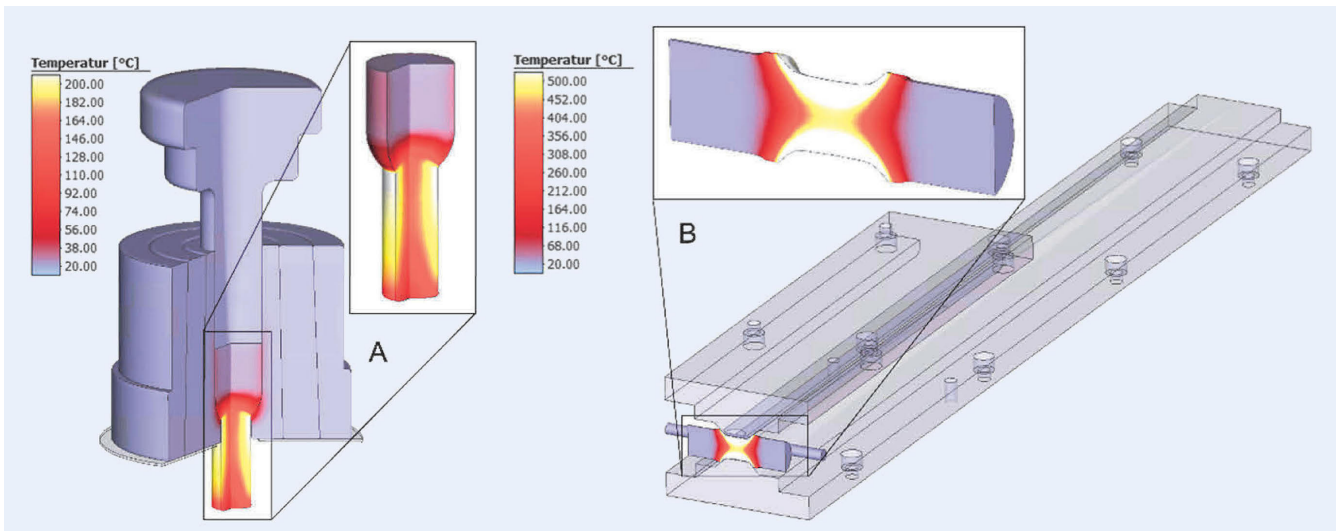


Bild 6. Temperaturentwicklung während des Voll-Vorwärts-Fließpressens (A) und während des Querkeilwalzens (B). Grafik: Fraunhofer IWU

hingegen stieg die Probentemperatur auf mindestens 500 °C an. Dies ist auf die deutlich höhere Umformgeschwindigkeit zurückzuführen: Beim Walzen verfahren die Werkzeugaktivteile mit einer Geschwindigkeit von 200 mm/s, der Stempel beim VVFP jedoch nur mit 20 mm/s.

Zur Verifikation des FE-Modells wurde bei den Realversuchen zum Fließpressen eine Temperaturmessung (Bild 7) mittels Thermoelemente durchgeführt. Beim Querkeilwalzen war dies bedingt durch die Prozesskinematik nicht umsetzbar.

Im Anschluss an die Umformversuche wurden Proben beider Umformtechnologien werkstofftechnisch charakterisiert. Ein Schwerpunkt war der verformungsinduzierte Martensitgehalt. Die Ergebnisse stimmten mit den im Zug- und Druckversuch ermittelten Ergebnissen von Hauser *et al.* [7] überein. Der Martensitgehalt des fließgepressten Rohlings lag bei 2,4 Vol.-%, der des gewalzten Rohlings bei 0,7 Vol.-%.

Für eine gezielte Technologieentwicklung bilden die oben beschriebenen Erkenntnisse die Basis zu den im Werkstoff auftretenden Umwandlungseffekten. Um zu vermeiden, dass fertigungsbedingte Einflüsse bei der Probenherstellung die Versuchs-

ergebnisse verfälschen, erfolgte nach der spanenden Bearbeitung ein Lösungsglühen. Nitride und Karbide wurden so in Lösung gebracht und verformungsinduzierter Martensit in Austenit zurückgewandelt. Mit diesem auf den Kupfergehalt der Legierung abgestimmten Lösungsglühen war eine fehlerfreie Umformung des Versuchswerkstoffs möglich. Ohne diese vorgelagerte Wärmebehandlung trat während der Umformung eine starke Rissbildung in den Probekörpern auf. Bild 8 stellt die Umformergebnisse der untersuchten Umformverfahren gegen.

Wie erwähnt, konnten die Simulationsergebnisse sowohl beim Querkeilwalzen als auch beim Fließpressen bestätigt werden. Durch den inkrementellen Charakter des Querkeilwalzens wird die entstehende Umformwärme nicht ins Werkzeug abgeleitet, was durch entsprechende Anlassfarben im Bereich der Umformzone belegt werden kann (Bild 8, links). Die Festigkeitssteigerung während des Prozesses führt, aufgrund der Behinderung der Versetzungsbewegung in den Gleitbändern des Austenits, zu einer abnehmenden Verformbarkeit des Werkstoffs. Daraus resultieren tangentielle Werkstoffaufwerfungen in den Walzproben.

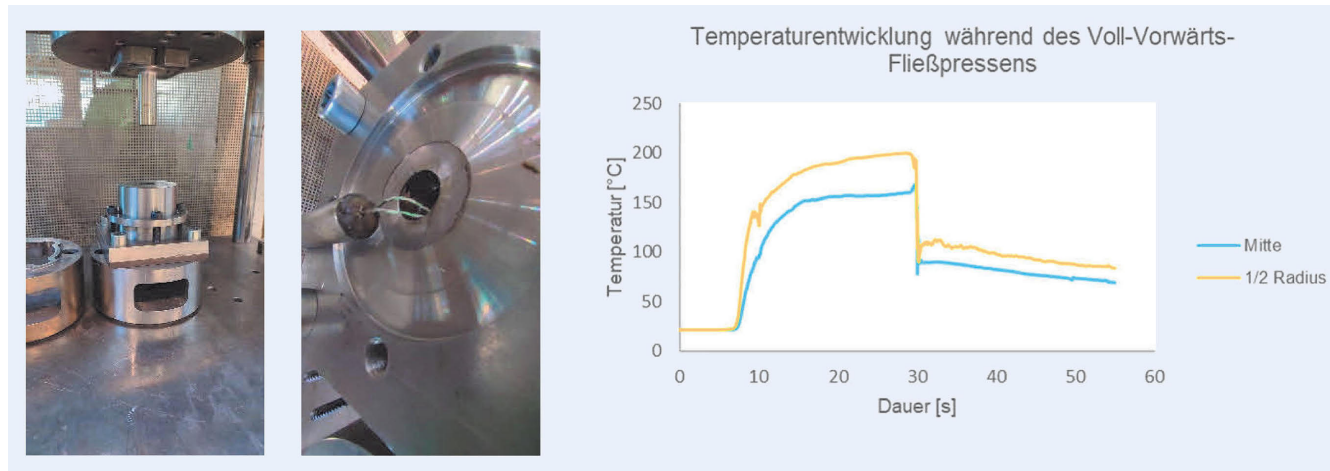


Bild 7. Temperaturentwicklung während des Voll-Vorwärts-Fließpressens. Links, Mitte: Experimente am Fraunhofer IWU, rechts: grafische Darstellung der Temperaturentwicklung. Foto: Fraunhofer IWU

Demgegenüber steht der fließgepresste Rundstab im rechten Teil des Bildes. Obwohl auch bei dieser Umformtechnologie erhebliche Umformwärme entsteht, kann diese durch den vollflächigen Kontakt von Werkstück zu Werkzeug abgeführt werden. Für die Bildung von Verformungsmartensit ist dieser Fakt von entscheidender Bedeutung.

Die Ergebnisse aus den Umformversuchen zeigen die generelle Möglichkeit zur Kaltumformung von Cr-Ni-Cu-Stahlguss. Mit dem Wissen um alle ablaufenden Umwandlungsprozesse im vorliegenden Material und den damit einhergehenden Eckpunkten zur Auslegung von Umformwerkzeugen und -prozessen ist es möglich, ohne weitere Wärmebehandlung einen Stahlguss mit TRIP/TWIP-Effekt kaltmassiv umzuformen.

4 Ansätze zur Kosten- und Ressourcenschonung

Die konventionelle Prozesskette für die Formteilherstellung aus austenitischem Stahl stellt sich wie folgt dar:

Block- oder Strangguss → Warmumformung durch Walzen oder Schmieden zu Blöcken oder Stäben in mehreren Stufen → Trennen der Langprodukte in kleinere massegerechte Abschnitte → Erwärmung auf Umformtemperatur → Massivumformung → Adjustierung. Die Anzahl der Schritte zeigt deutlich, wie wirtschaftlich aufwendig, langwierig, arbeits- und kostenintensiv die Fertigung ist. Durch die Entwicklung einer Kaltumformtechnologie zur Bearbeitung von metastabilem Stahlguss kann mit dem Einsatz von gegossenen Halbzeugen die Prozesskette nicht nur deutlich verkürzt werden, sondern es entfallen auch die sonst üblichen Erwärmungs- und Wärmebehandlungsschritte. Somit ist es möglich, eine jährliche Energieeinsparung in Höhe von ~1,5 GJ pro Tonne gefertigte Bauteile zu erzielen.

Nicht nur durch die Kaltumformung können erheblich Kosten gespart werden, sondern auch durch die Substitution des Elements Nickel mit dem wesentlich kostengünstigeren Element Kupfer. Nickel in Stahlwerkstoffen führt zu einer signifikanten Erhöhung der Zähigkeit und ist vor allem für hoch beanspruchte Bauteile ein wichtiges Legierungselement. Im Bereich der korrosionsbeständigen Stähle ist Nickel für die Einstellung eines austenitischen Gefüges bei Raumtemperatur essenziell, kann jedoch mit dem ebenfalls Austenit stabilisierenden Element Kupfer teil-



Bild 8. Vergleich der Umformergebnisse. Links: gewalztes Bauteil (L = 73 mm, Ø = 23 mm) und Querkeilwalzen Anfangsform (L = 68 mm, Ø = 23 mm), rechts: Anfangsform des Voll-Vorwärts-Fließpressens (L = 44 mm, Ø = 26 mm) und fließgepresstes Bauteil (L = 110 mm, Ø = 16,5 mm). Foto: Fraunhofer IWU

weise ersetzt werden. Aufgrund der besonderen Eigenschaften und der sich daraus ergebenden Einsatzgebiete wird der Nickelverbrauch zukünftig weiterhin kontinuierlich zunehmen. Dies spiegelt sich in der Entwicklung des Nickelpreises deutlich wider. Begründet in seinem Vorkommen und den seit Februar 2022 vorherrschenden weltpolitischen Spannungen gewinnt dieser Werkstoff an strategischer Bedeutung, unter anderem in Bezug auf Rohstoffverfügbarkeit und den damit in Verbindung stehenden Marktpreisen (Preissteigerung um 400 %) [8,9].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde ein Ansatz zur Kaltmassivumformung von metastabilen austenitischem Cr-Ni-Cu-Stahlguss vorgestellt. Dabei wurde besonders auf deren Potenzial bei Ressourcenschonung und Energieeinsparung hingewiesen. Zur werkstoffangepassten Entwicklung einer Umformtechnologie wurde auf verschiedenste Kaltumformverfahren zurückgegriffen, um den Einfluss der unterschiedlichen Spannungszustände im Werkstoff auf das Kaltumformvermögen vergleichen zu können.

Im nächsten Schritt soll die Evolution des Martensits während der Umformung in einem Finite-Elemente-Modell abgebildet werden. So kann zukünftig sowohl der Umformprozess an sich abgebildet wie auch die temperatur- und spannungsabhängige Martensitumwandlung prognostiziert werden.

DANKSAGUNG

Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 449797210.

Literatur

- [1] Stringfellow, R. G.; Parks, D. M.; Olson, G.B.: A constitutive model for transformation plasticity accompanying strain-induced martensitic transformations in metastable austenitic steels. *Acta Metallurgica et Materialia* 40 (1992) 7, pp. 1703–1716
- [2] Wendler, M.; Ullrich, C.; Hauser, M. et al.: Quenching and partitioning (Q&P) processing of fully austenitic stainless steels. *Acta Materialia* 133 (2017), pp. 346–355
- [3] Fahr, D.: Stress-and Strain-Induced Formation of Martensite and its Effects on Strength and Ductility of Metastable Austenitic Stainless Steels. *Metallurgical Transactions* 2 (1971), pp. 1883–1892
- [4] Hauser, M.; Nitzsche, P.; Weidner, A. et al.: Effect of Cu addition on solidification, precipitation behavior and mechanical properties in austenitic CrNi–N stainless steel. *Materials Science and Engineering A* 862 (2023), #144422
- [5] Weiß, A.; Wendler, M.; Lehmann, G. et al.: Hochfester kaltumformbarer austenitischer Stahlguss mit TRIP/ TWIP-Eigenschaften. *Konstruktion* 64 (2012) 7/8, S. 63–66
- [6] Biermann, H.; Aneziris, C. G. (eds.): *Austenitic TRIP/TWIP Steels and Steel-Zirconia Composites: Design of Tough, Transformation-Strengthened Composites and Structures*. Cham: Springer International Publishing 2020
- [7] Grüner, P.: *Das Walzen von Hohlkörpern und Kalibrieren von Werkzeugen zur Herstellung nahtloser Rohre*. Heidelberg: Springer-Verlag 1959
- [8] Spittel, T.; Hensel, A.: *Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag 1983
- [9] Der Spiegel: Der Nickelpreis steigt auf über 100.000 Dollar pro Tonne. Stand: 08.03.2022. Internet: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/nickel-preis-steigt-auf-rekordhoch-a-93b0053e-efb3-404a-adf6-15a001afe827>. Zugriff am 18.09.2023



Nadine Lehnert, M.Sc.
Foto: Fraunhofer IWU

Dipl.-Ing. **Jürgen Steger**

Prof. Dr.-Ing. **Verena Kräusel**
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainerstr. 88, 09126 Chemnitz
Tel. +49 371 / 5397-1379
nadine.lehnert@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. **Pia Nitzsche**
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Werkstofftechnik
Gustav-Zeuner-Str. 5, 09599 Freiberg

Dr.-Ing. **Marco Wendler**
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Eisen- und Stahltechnologie
Leipziger Str. 34, 09599 Freiberg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)