

## Integration des interkritischen Glühens in eine Umformprozesskette für die Herstellung von Hohlteilen

B. Mašek<sup>1+2</sup>; H. Staňková<sup>1+2</sup>; J. Malina<sup>1+2</sup>, R. Glass<sup>3</sup>; L.W. Meyer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Westböhmische Universität Pilsen, Fakultät Maschinenbau, FORTECH, Univerzitní 22, CZ-30614, Tschechische Republik

<sup>2</sup> TU Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Professur Werkstoffe des Maschinenbaus, Erfenschlager Str. 73, D-09125 Chemnitz, Deutschland

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer Straße 88, D- 09126 Chemnitz, Deutschland  
masekb@kmm.zcu.cz, hstankov@kmm.zcu.cz, mali@centrum.cz,  
Roland.Glass@iwu.fraunhofer.de, lotharmeyer@wsk.tu-chemnitz.de

### Kurzfassung

Eine Erhöhung der Effektivität der Umformprozesse stellt ein wichtiges Problem dar. Für die Lösung dieser Problematik müssen hochintensive Verformungen des Werkstoffes beherrscht werden. Für die Erreichung eines hohen Gesamtumformgrades werden sehr oft Prozesse mit inkrementellen Umformschritten eingesetzt. Eine neue Strategie auf diesen Gebiet ist die Prozesskette Bohrungsdrücken - Drückwalzen. In dieser Prozesskette wird als Erstes durch Bohrungsdrücken aus einer vollen Stange ein hohles Halbzeug warm umgeformt. Anschließend wird dieses hohle Halbzeug durch Drückwalzen halbwarm oder kalt in die Finalform verformt. In beiden Prozessketten ist es erforderlich, Werkstoffe mit geeigneten technologischen Eigenschaften, vor allem mit guter Umformbarkeit, zu verwenden. Zur Zeit sind auf diesem Gebiet eine ganze Reihe von Werkstoff- und Behandlungsstrategien in der Entwicklung. Eine neue geeignete Strategie für niedriglegierte Stähle ist eine Warmumformung durch Bohrungsdrücken mit nachträglichem interkritischem Glühen zum Erreichen eines sehr plastischen Gefüges mit TRIP Effekt. Auf diese Weise behandelte Halbzeuge werden danach durch Drückwalzen fertig gewalzt. Dabei entsteht nicht nur die gewünschte Kontur, sondern der Werkstoff erhält durch die Kaltverfestigung und Umwandlung des Restaustenits in Martensit günstige mechanische Eigenschaften.

### 1. Einführung

Ein effizienter Weg zur Erhöhung der Anzahl an Hohlteilen kann der Einsatz niedriglegierter und dadurch kostengünstiger Stähle sein. In einer Kombination von innovativen Technologien wird es möglich sein formkomplizierte Teile zu erzeugen. Ziel dieses Experimentes ist die Erprobung des Einsatzes von niedriglegierten, mehrphasigen Stählen für die Herstellung von mehrfach angesetzten Hohlteilen aus einer Stange durch eine Prozesskette Bohrungsdrücken- Drückwalzen.

TRIP Stähle sind Mehrphasenstähle mit einem Gefüge, das aus Ferrit, Bainit und Restaustenit besteht. Dadurch weisen sie eine hervorragende Kombination von hoher Festigkeit bei hoher Dehnung auf [1]. Ein Haupteinsatz dieser Stähle wird vorwiegend in der Automobilindustrie in Bereich der Blechkomponenten für den Karosseriebau gesehen. Das Potenzial dieser Stähle für den Einsatz in Massivteilen wird noch nicht ausgenutzt. In diesem

Artikel wird eine unkonventionelle Umformherstellungsstrategie für rotationssymmetrische Hohlteile vorgestellt. Durch den Einsatz einer Herstellungskette mit den inkrementellen Umformverfahren Bohrungsdrücken - interkritisches Glühen - Drückwalzen wurden dünnwandige, abgesetzte Halbzeuge mit einem Durchmesser von 50 mm, 44 mm und 37 mm und einer Wandstärke von ca. 4 mm hergestellt.

## 2. Werkstoffauswahl

Im Experiment wurden zwei TRIP Stahlsorten untersucht. Es handelte sich um die Legierungsstrategien C-Mn-Si (T1) und C-Mn-Si-Nb (T2) (Tab. 1). Der Stahl C-Mn-Si stellt eine klassische Legierungsstrategie für die Einstellung eines TRIPfähigen Gefüges dar. Die zweite Stahlsorte beinhaltet zusätzlich als Mikrolegierungselement Niob und weist dadurch eine etwas höhere Festigkeit auf.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Nb	Mo	W
T1	0,206	1,418	1,849	0,007	0,005	0,007	0,071	0,059	0,006	0,002	0,02	0,02
T2	0,21	1,449	1,797	0,008	0,005	0,008	0,072	0,058	0,006	0,059	0,02	0,02

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der experimentellen Werkstoffe.

## 3. Experimentelle Prozesskette

Für das Experiment wurden inkrementelle Umformverfahren ausgewählt. Im ersten Schritt wurde aus einer Stange mit einem Durchmesser von 58 mm durch Bohrungsdrücken unter Bedingungen der Halbwarmumformung ein hohles Halbzeug mit einem Durchmesser von 51 mm und einer Wandstärke von ca. 9 mm gefertigt. Anschließend wurde das Halbzeug interkritisch geblüht. Durch diese Glühen wurde das ursprünglich ferritisch – perlitische Gefüge in das mehrphasige, TRIPfähige Gefüge Ferrit – Bainit – Restaustenit mit einer hervorragenden Plastizität umgewandelt. In nächsten Schritt wurde dieses Halbzeug durch Drückwalzen kaltumgeformt. Durch dieses Verfahren wurde neben der Verfestigung die Finalform in mehreren Schritten erreicht. Im ersten Schritt wurde der Durchmesser von ca. 50 mm auf 44 mm und im zweiten Schritt auf 37 mm gewalzt.

### 3.1. Bohrungsdrücken

Das Bohrungsdrücken wurde mit Hilfe der Bohrungsdrückmaschine BDM 2000 durchgeführt. Das Verfahren, so wie die Umformmaschine BDM 2000, wurde im Fraunhofer Institut IWU in Chemnitz entwickelt [2], [3]. Der Bohrungsdrückprozess ist ein effektives, abfallloses und flexibles Umformfahren für Herstellung von Hohlprodukten aus vollem Stangenhalbzeug.

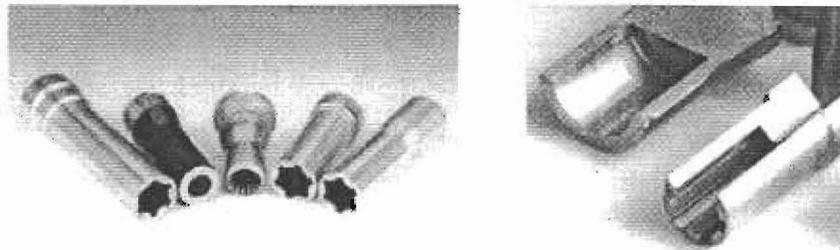


Abb. 1: Beispiele von Hohlteilen hergestellt durch das Bohrungsdrücken [2]

Mit Hilfe der Profildorne ist es möglich, verschiedene Innenkonturen herzustellen. (Abb. 1) [2], [3]. Das Bohrungsdrücken eignet sich für Kalt-, Halbwarm- als auch Warmumformung. Das Bohrungsdrückverfahren (Abb. 2) basiert auf Axialdrücken des Bohrungsdrückstempels in ein stangenförmiges Halbzeug bei gleichzeitiger Außenunterstützung durch drei mitgeschleppte Umformrollen. Diese Rollen behindern den Werkstofffluss nach außen in radialer Richtung in Radialrichtung. Dadurch wird der Werkstoff schraubenförmig in Gegenrichtung des Dornes gedrückt und es entsteht ein hohles Umformteil.

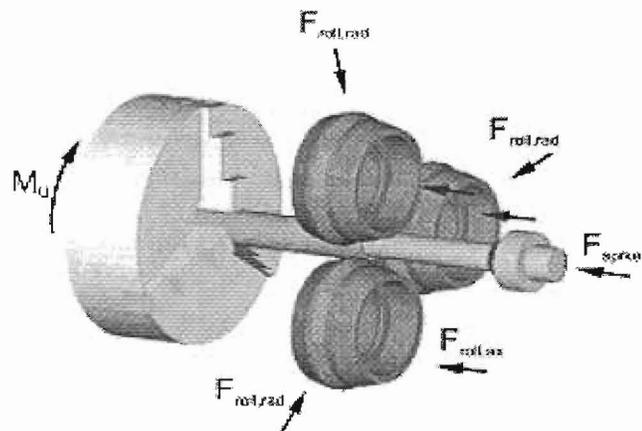


Abb. 2: Prinzip des Bohrungsdrückens

Sämtliche Proben in diesen Untersuchungen wurden unter identischen Bedingungen auf einen Außendurchmesser von 51 mm bearbeitet (Abb. 4). Der Dorn Durchmesser betrug 33 mm. Vor dem Bohrungsdrücken wurden alle Proben auf eine Starttemperatur von 750°C erwärmt. Der Umformprozess wurde mit einer Thermographiekamera aufgenommen (Abb. 3). Durch diese Aufnahmen konnte das Temperaturfeld des Rohlings analysiert werden. Es wurde festgestellt, dass sich die tatsächliche Temperatur des Prozessesbeginns in einem Bereich zwischen 680 bis 700°C befand. Unmittelbar nach der Umformung ist ein gleichmäßiges Temperaturfeld entstanden, wobei die mittlere Temperatur 650°C betrug.

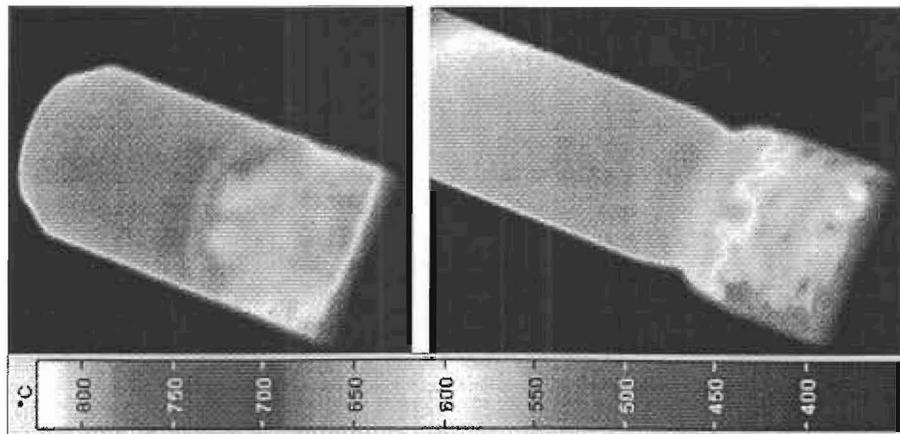


Abb. 3: Temperaturfeld im Halbzeug vor und nach dem Bohrungsdrücken

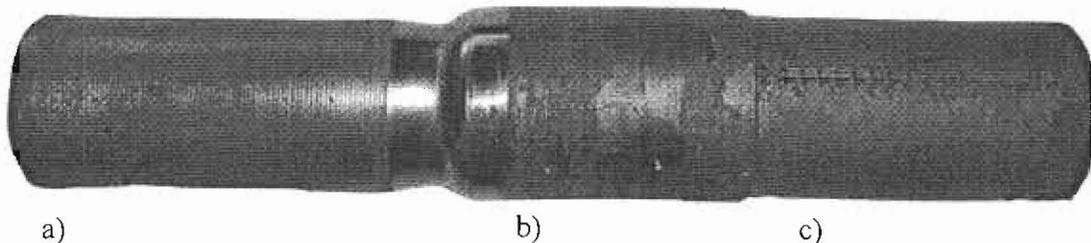


Abb. 4: Bohrungsdrücktes Halbzeug bei 680-700°C: a) Hohlteil, b) ursprüngliches Halbzeug, c) Probenträger

Nach dem Bohrungsdrücken wurde bei beiden Werkstoffvarianten eine metallographische Analyse durchgeführt. Für die ersten 5 bis 10 mm, gemessen von der Stirn des Halbzeuges, ist ein gleichmäßiges ferritisch-perlitisches Gefüge charakteristisch. Im weiteren Verlauf wurden die Gefüge durch die intensive Verformung stark beeinflusst, perlitische Insel zerfielen. Eine dreidimensionale Oberflächenrekonstruktion durch die Konfokalmikroskopie hat schwierig ätzbare Partikel identifiziert (Abb. 5). Erst mittels Koble – Platin Abdrucktechnik war es möglich, diese Partikel als perlitische Kolonien zu erkennen und damit die Existenz des unteren Bainits auszuschließen (Abb. 6).

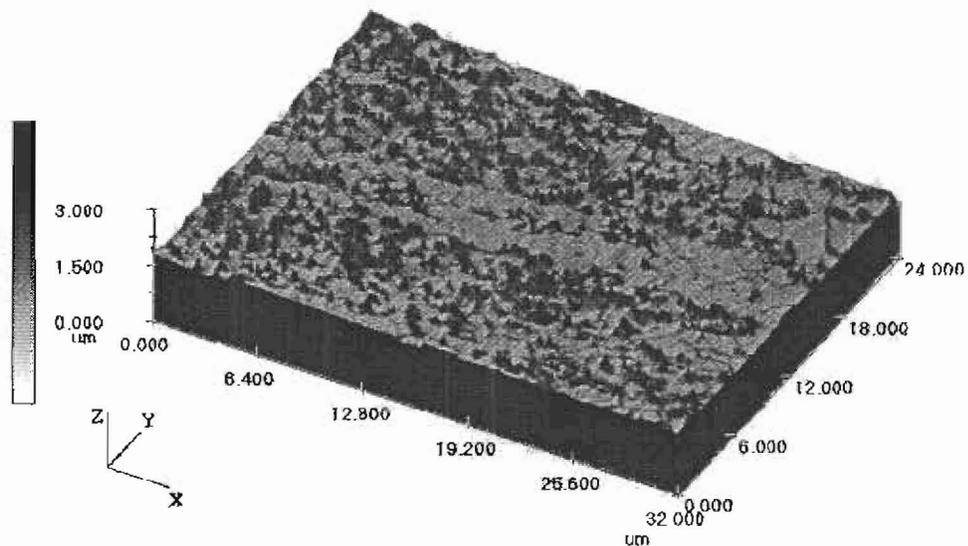


Abb. 5: 3D Rekonstruktion des Oberflächenreliefs des T1 Stahls C-Mn-Si nach dem Bohrungsdrücken bei einer Temperatur von 750°C, Konfokalmikroskopie

Parallel dazu wurde ein Einfluss des Stempels und der Umformrollen auf die Werkstoffverformung und dadurch auf die Gefügeentwicklung untersucht. Im Bereich der Innenkontur des Hohlteiles wurde keine signifikante Abweichung der Gefüge beobachtet. In der Außenschicht wurden die Gefüge intensiv in Verformungsrichtung gestreckt.

### 3.2. Interkritisches Glühen

Um ein geeignetes TRIP-Effektgefüge für die nachträgliche Kaltverformung zu gewinnen, wurde ein interkritisches Glühen durchgeführt. Dieses Glühen wurde zuerst an kleinen Abschnitten erprobt. Aus einer vorangegangenen Glühprozessoptimierung wurden zwei Varianten mit unterschiedlichen Austenitisierungshaltezeiten ausgewählt [4]. Die Hauptaufgabe dieses Schrittes war das Finden eines energetisch sparsamen,

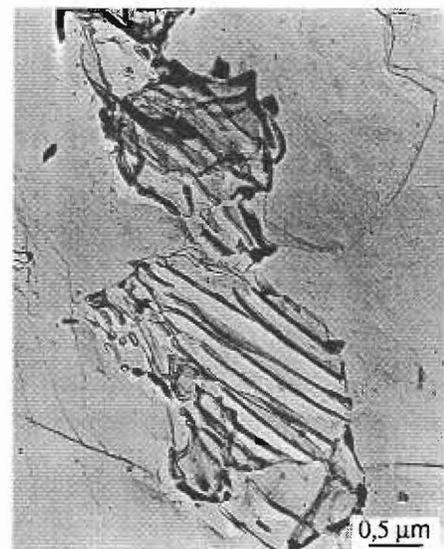


Abb. 6: Feinperlit im Gefüge nach dem Bohrungsdrücken Nital, TEM, Koble – Platin Abdrucktechnik

das Finden eines energetisch sparsamen,

funktionsfähigen Prozesses für diese Teile. Dabei war es wichtig, einen möglichst großen Anteil des neuen Ferrits in dem Gefüge zu erziehen. Deshalb wurden bei einer ausgewählten Austenitisierungstemperatur von 810°C zwei Haltezeiten von 15 bzw. 30 Minuten geprüft. Nach der Austenitisierung folgte eine Abkühlung auf die Temperatur der bainitischen Umwandlung von 420°C mit 8 Minuten Haltezeit im Salzbad. Danach wurden die Proben im Wasser auf Raumtemperatur abgekühlt. Aus diesem interkritisch behandelten Werkstoff wurden Proben für die Metallographie und für das mechanische Prüfen entnommen.

Nach der Behandlung wiesen die Proben aus dem T1-Stahl C-Mn-Si kleine Insel von Restaustenit in der Ferritmatrix auf (Abb. 7). Es wurde nur ein niedriger Anteil an Bainit festgestellt. Durch die Koble – Platin Abdrucktechnik wurden in einigen Restaustenitinseln MA Anteile identifiziert. Unterschiede zwischen beiden untersuchten Haltezeiten wurden durch optische- als auch Rasterelektronenmikroskopie nicht gefunden (Abb. 8). Die Gefüge beinhalten zwar einzelne Zementitlatten, aber bei einem solchen geringfügigen Anteil war kein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu erwarten. Die unterschiedlichen Haltezeiten von 15 und 30 Minuten beim Austenitisieren hatten bei beiden Stählen keinen Einfluss auf Restaustenitmenge in den Gefügen. In allen Fällen schwankten die Restaustenitanteile zwischen 15 bis 17% (Tab. 2).

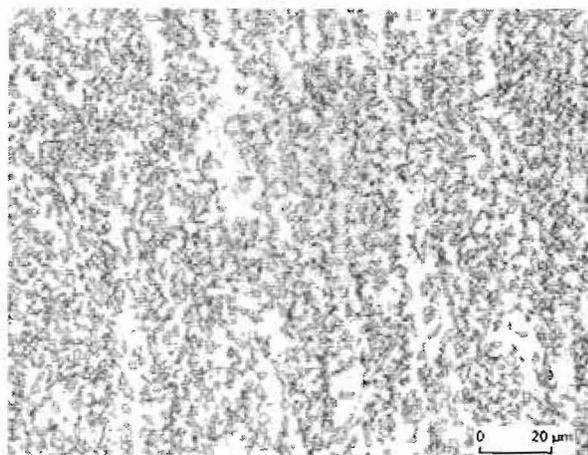


Abb. 7: Gefüge TRIP C-Mn-Si nach interkritischem Glühen, Haltezeit 15 Minuten bei einer Temperatur von 810°C und 8 Minuten bei 420°C

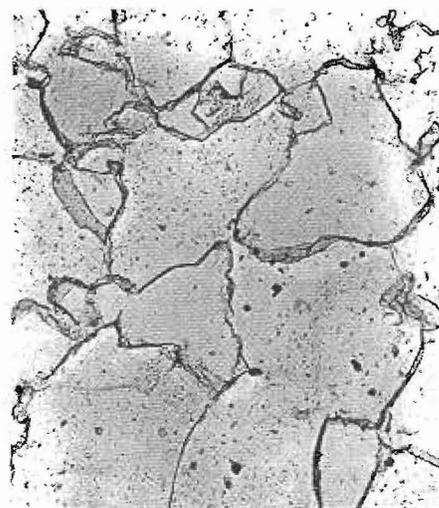


Abb. 8: Gefüge TRIP Mn-Si-Nb nach interkritischem Glühen, Haltezeit 30 Minuten bei einer Temperatur von 810°C und 8 Minuten bei 420°C

### 3.3. Mechanische Eigenschaften nach interkritischen Glühen

Die mechanischen Eigenschaften wurden durch einen Miniaturzugversuch ermittelt (Tab. 2, Abb. 9). Bei dem TRIP Stahl C-Mn-Si mit 15 Minuten Austenitisierung lag die Festigkeit  $R_m$  bei 904 MPa bei 30% Dehnung. Die unterschiedlichen Haltezeiten hatten fast keinen Einfluss. Die Festigkeitsteigerung um 23 MPa kann durch einen etwas höheren MA-Anteil, oder eventuell durch einen etwas höheren Anteil an Restaustenit verursacht werden.

Bei dem TRIP Stahl C-Mn-Si-Nb mit 30 Minuten Austenitisierungshaltezeit wurde eine Festigkeit von 994 MPa bei 28 % Dehnung erreicht. Bei einer Haltezeit von 15 min lag die Festigkeit bei gleicher Dehnung um 40 MPa niedriger. Eine etwas höhere Festigkeit des TRIP Stahls C-Mn-Si-Nb ist durch die Verfestigung durch die Feinausscheidung der Nb-Karbide in der Ferritmatrix zu erklären.

Dieses Experiment hat gezeigt, dass es möglich ist, die kürzere, 15 Minuten lange Austenitisierungszeit für weitere Anwendungen zunutzen.

Im folgenden Schritt wurde ein Einfluss der Kaltumformung auf eine Änderung der mechanischen Eigenschaften untersucht. Die interkritisch geglühten Werkstoffproben aus beiden Stählen mit den Abmessungen 9x5x40 mm wurden in 5 Schritten jeweils um 20% flachgestaucht. Zwischen den einzelnen Verformungsschritten wurden die Proben um 90 Grad in der Längsachse gedreht und eine Probe für metallographische Untersuchungen entnommen. Nach dem fünften Verformungsschritt wurde eine kumulierte Verformung von 100% erreicht. Aus diesem Zustand wurden die mechanischen Eigenschaften mittels Miniaturzugversuch ermittelt (Tab. 3) und der Anteil des Restaustenits festgestellt. Proben wurden im Richtung der Längsachse orientiert.

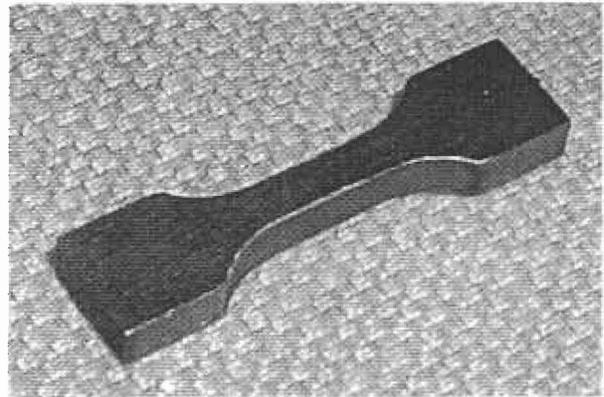


Abb. 9: Aufnahme einer Probe für einen Miniatur-Zugversuch, Messlänge 5 mm, Querschnitt 1,2 x 2 mm

Stahl	Verfahren	RA [%]	R <sub>m</sub> [MPa]		R <sub>p0,2</sub> [MPa]		A <sub>3,2</sub> [%]	
T1 C-Mn-Si	810°C/15 Min. - Salzbad 420°C/8 Min. - Wasser	15	914	904	460	429	29	30
			893		397		31	
	810°C/30 Min. - Salzbad 420°C/8 min - Wasser	17	924	927	454	451	33	32
			930		447		31	
T2 C-Mn-Si-Nb	810°C/15 Min. - Salzbad 420°C/8 Min. - Wasser	16	1031	1019	511	524	24	28
			1006		536		31	
	810°C/30 Min. - Salzbad 420°C/8 Min. - Wasser	15	993	994	543	548	27	28
			994		553		29	

Tab. 2: Varianten des interkritischen Glühverfahrens und entsprechende mechanische Eigenschaften

Stahl	Verfahren	RA [%]	R <sub>m</sub> [MPa]		R <sub>p0,2</sub> [MPa]		A <sub>3,2</sub> [%]	
T1 C-Mn-Si	810°C/15 Min. - Salzbad 420°C/8 Min. - Wasser	unter 3 %	1074	1115	992	1041	17	16
			1155		1090		15	
T2 C-Mn-Si-Nb	+ 100% Kaltverformung in 5 Stufen	unter 3 %	1129	1174	1055	1083	13	12
			1218		1110		10	

Tab. 3: Mechanische Eigenschaften der TRIP Stähle nach kumulierter Kaltverformung von 100%

Bei allen kaltverformten Proben wurden kleine Inseln des verformungsinduzierten Martensits festgestellt. Es wurden keine gravierenden Gefügeunterschiede nach 20% und 100% Verformung festgestellt. Eine Röntgenstrahlbeugungsanalyse zeigte, dass der Anteil des Restaustenits bereits nach 20% Verformung unter die ermittelbare Grenze von 3% sank.

Was die mechanischen Werte betrifft, ging die Dehnung nach der Verformung zurück,

erreicht aber immer noch 16% bzw. 12% Dehnung bei einer Festigkeit, die über 1000 MPa lag. Die Festigkeitssteigerung betrug 211 MPa bei dem Stahl T1 ohne Niobzusatz und 231 MPa bei dem Stahl mit Niobzusatz. Die Bruchflächen nach dem Zugversuch wiesen einen typischen Verformungsbruch mit sehr feiner Grübchenstruktur auf.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurden alle bohrungsgedrückten Halbzeuge einheitlich interkritisch behandelt. Diese Behandlung bestand aus 15 Minuten langem Halten bei einer Austenitierungstemperatur von 810 °C mit nachträglicher schneller Abkühlung auf die bainitische Umwandlungstemperatur von 420 °C. Bei dieser Temperatur wurden die Halbzeuge im Salzbad 8 Minuten gehalten und danach auf Raumtemperatur wassergekühlt.

### 3.4. Drückwalzen

Die Analyse des Werkstoffverhaltens (Tab. 2), hat gezeigt, dass die Halbzeuge geeignete Eigenschaften aufweisen und dass es möglich ist, diese Teile durch Drückwalzen kalt umzuformen. Beim Drückwalzen wurde der TRIPeffekt, genauso wie andere Verfestigungsmechanismen, zusammen mit der guten Plastizität der Stähle genutzt. In diesem Modellverfahren wurden die Rohlinge außen spanend bearbeitet, bis der rohrförmige Teil einen Außendurchmesser von 50 mm und eine Wandstärke von 5 mm besaß. (In der Finalprozesskette wird mit diesem Zwischenschritt nicht gerechnet.) Danach wurden die Halbzeuge inkrementell durch Drückwalzen bearbeitet. Das Drückwalzen der Finalform lief in zwei Stufen ab. Zuerst wurde der Außendurchmesser von 50 mm auf 44 mm abgesetzt. In der zweiten Stufe wurde durch eine weitere Absetzung auf den Durchmesser von 37 mm fertiggewalzt.

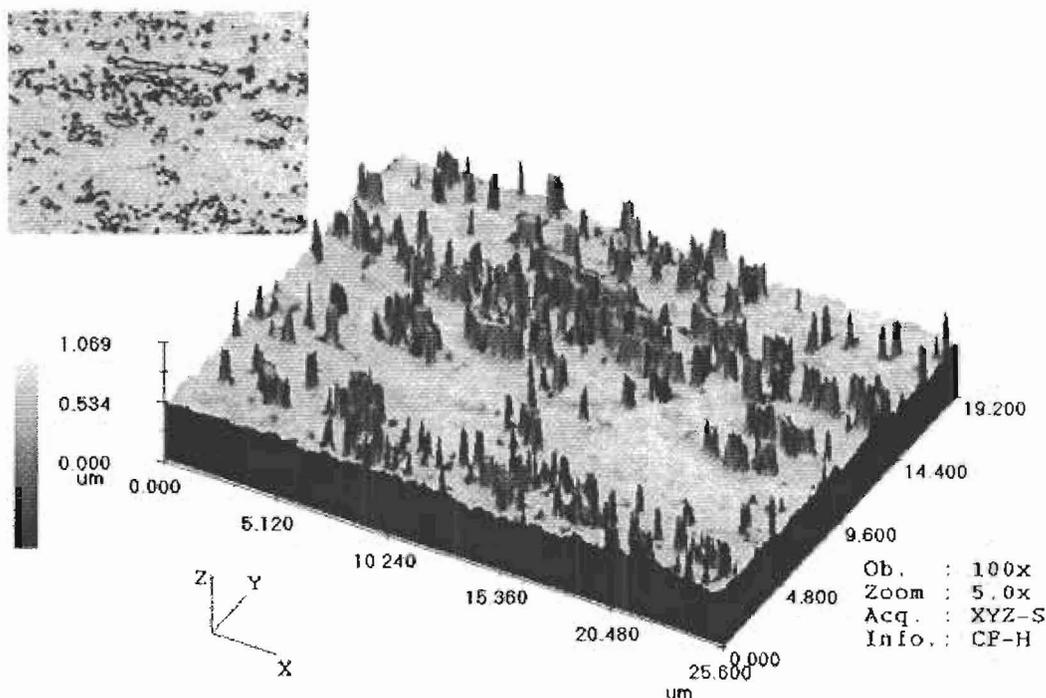


Abb. 10: 3D Rekonstruktion des Oberflächenreliefs des Stahls C-Mn-Si nach dem Kaltdruckwalzen, Gefüge: Ferritmatrix + MA Anteile und Karbide, Vergrößerung 12000x

Aus beiden Querschnitten wurden Proben für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und für die metallographische Analyse entnommen. Die Finalgefüge bestand aus verformter Ferritmatrix mit fein dispergierten MA-Anteilen (Abb. 10).

Auf Grund der guten Ergebnisse wurde ein Drückwalzverfahren mit höherer Walzabnahme von 12% untersucht. Auch diese Strategie mit sehr intensiven Umformschritten hat es ermöglicht, ein doppelt abgesetztes Hohlteil herzustellen (Abb. 11).

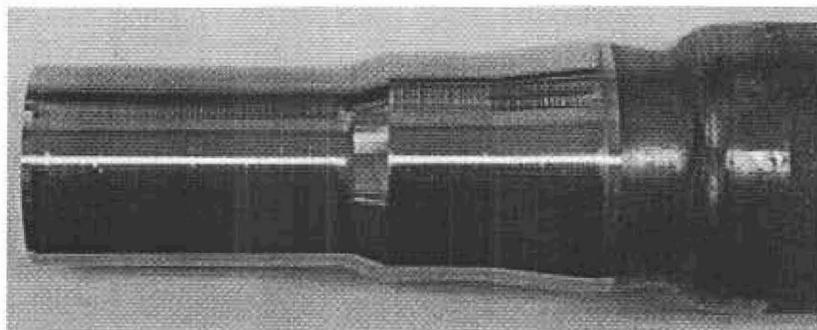


Abb. 11: Beispiel eines hohles Umformteiles aus TRIP Stahl C-Mn-Si-Nb nach einem Drückwalzen mit 12% Walzabnahme

#### 4. Zusammenfassung

Auf Grund von bisherigen Erfahrungen, gekoppelt mit Ergebnissen der Werkstoffsimulation der Prozesse der inkrementellen Umformung, ist es gelungen, ein neues Verfahren zu entwerfen und erfolgreich zu erproben. Dieses Verfahren verbindet die Vorteile der Prozesskette Bohrungsdrücken – interkritisches Glühen – Drückwalzen mit einem unkonventionellen Einsatz der niedriglegierten TRIP Stähle. Es ist gelungen, ein geeignetes werkstofftechnologisches Profil der Stähle C-Mn-Si und C-Mn-Si-Nb einzustellen. Dank dieses innovativen Konzeptes wurde ermöglicht, durch inkrementelle Umformprozessketten ein dünnwandiges Hohlteil mit zwei Absätzen aus einer vollen Stange herzustellen. Gleichzeitig wurde durch dieses abfalllose Konzept ein sehr hoher Nutzungsgrad des Werkstoffes erreicht.

#### Danksagung

Diese Arbeit und die vorgestellten Ergebnisse wurden mit der Hilfe des Projekts 1M06032 entwickelt.

#### Literatur

- [1] Bleck, W.: Using the TRIP efekt – the down of a promising group of cold formable steels. In Proceedings of International Conference on TRIP – Aided High Strength Ferrous Alloys, Belgium, 2002.
- [2] Neugebauer, R.; Weidlich, D.; Thomas, V.: Neues modulares Maschinenkonzept zum Bohrungsdrücken; Umformtechnik; 1997, 3, 46-48.
- [3] Neugebauer, R.; Weidlich, D.; Thomas, V.: Experimentalanlage zum Bohrungsdrücken, BDM2000 - Prototyp einer neuen Maschinengeneration. Umformtechnik: 1999, 1, 24-25.
- [4] Němeček, S.; Nový, Z.; Staňková, H.; Mašek, B.: Heat treatment optimization of TRIP steels, International Conference on Heat Treatment, Jihlava, 2004, ISBN 80-239-3561-5.