

The Determination of the Forging Behaviour of Scale on the Steel Surface during Forging

Drop forging with all its partial processes describes one essential part of forging. According to information provided by the Industrieverband Massivumformung e. V. (German Forging Association), about 3 million tons of semi-finished products and prefabricated parts are produced world-wide. Die forging takes up more than 60 per cent of the total production. In these statistics, Germany is assuming a position among the top 5 world-wide [1]. Depending on raw material quantity and alloys that are

processed, hot forging results in up to three per cent by weight of scale starting from the initial weight which must be seen as a loss and which influences the yield. Steel is the material group most commonly used for drop forging. Scale formation on the work piece surface has a negative effect on the process as well as on tool wear and additionally on the quality of the surface of the forged product.

Beitrag zur Bestimmung des Umformverhaltens von Zunder auf der Stahloberfläche während der Massivumformung

Dr.-Ing. Marcel Graf und
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Kawalla, Freiberg

Das Gesenkschmieden mit all seinen Teilprozessen ist ein Hauptbestandteil der Massivumformung, mit welcher nach Angaben des Industrieverbands Massivumformung e. V. weltweit rund 3 Millionen Tonnen Halbzeuge und Fertigbauteile erzeugt werden. Auf das Gesenkschmieden entfallen dabei über 60 Prozent der Gesamtproduktion. Deutschland nimmt weltweit bei diesen Statistiken einen Platz in den Top 5 ein [1]. Je nachdem, wie viel

Ausgangsmaterial und welche Legierung umgeformt werden, entstehen bei Warmmassivumformprozessen bis zu drei Gewichtsprozent Zunder vom Ausgangsgewicht, was als Verlust anzusehen ist und das Ausbringen beeinflusst. Die für das Gesenkschmieden am häufigsten eingesetzte Werkstoffgruppe bilden Stähle. Die Bildung von Zunder an der Werkstückoberfläche wirkt sich negativ sowohl auf den Prozess als auch auf den Werkzeugverschleiß und zusätzlich auf die Qualität der Oberfläche des massivumgeformten Produkts aus.

Zunderverhalten während der Warmumformung

Bei verschiedenen Warmumformverfahren bildet sich durch Vorhandensein von Sauerstoff oder anderer Medien oberhalb rund 600 °C und unter bestimmten Druckverhältnissen auf der Oberfläche des Stahls eine Zunderschicht aus. Der Zunder ist dabei ein Reaktionsprodukt eines ablaufenden Diffusionsprozesses von Eisen- und Sauerstoffionen, die sich aufgrund von Konzentrationsunterschieden und Fehlstellen/Leerstellen im Zunder, bestehend aus einzelnen Schichten, bewegen.

Der Oxidationsvorgang ist dabei von den technologischen Bedingungen, das heißt von der Temperatur, den Zeiten und der chemischen Zusammensetzung abhängig. Mit steigender Temperatur und größerer Zeitdauer nimmt die Oxidation auf der Metalloberfläche zu. Der Aufbau der Zunderschicht ist immer ähnlich. Gekennzeichnet ist der Zunder durch die drei folgenden geschichteten Phasen. Die äußerste Schicht, das Hämatit, repräsentiert das höchstwertigste Eisenoxid des Zunders. Die mittlere

Phase wird durch das Magnetit geprägt und als die dem Metall am nächstliegende Schicht tritt das Wüstit auf. Diese innerste Phase ist gleichzeitig die Instabilste und verfügt über die geringste Eisenwertigkeit.

Innerhalb der Warmumformung wird der Zunder temporär in Primär-, Sekundär- und Tertiärzunder eingeteilt. Diese verschiedenen Arten entstehen bei unterschiedlichen Prozessbedingungen und reagieren verschieden

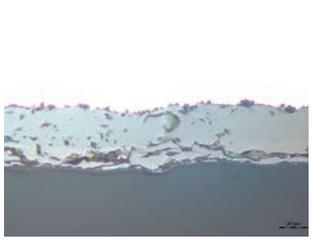
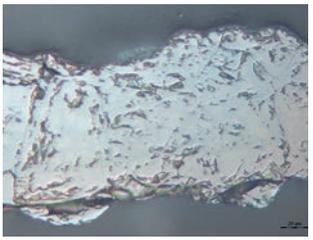
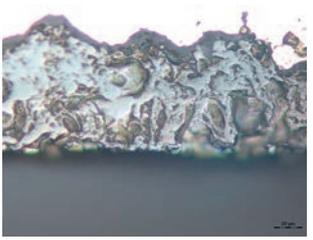
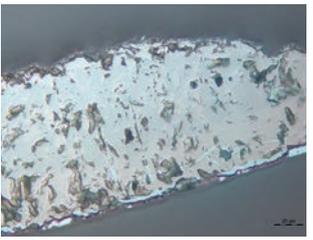
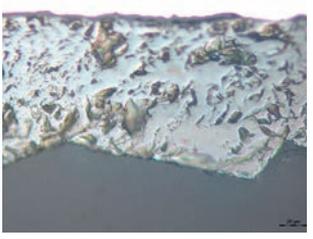
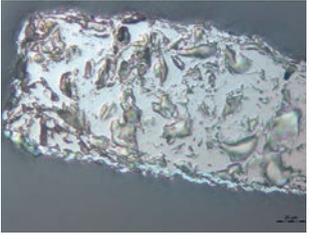
	10 s	40 s	60 s	120 s
1000 °C				
	15 % Poren	18 % Poren	24 % Poren	28 % Poren
1200 °C				
	18 % Poren	26 % Poren	31 % Poren	39 % Poren

Bild 1: Übersicht zum Einfluss von Temperatur und Pausenzeit auf die Porenbildung im Primärzunder am Beispiel der Stahlmarke C45 (500-fache Vergrößerung).

auf die äußeren Belastungen (zum Beispiel Spannungen) während des Prozesses. Sie unterscheiden sich auch in der volumenmäßigen Ausbildung. Der Primärzunder entsteht bei Wiedererwärmung des Ausgangsmaterials (meistens in konventionellen Öfen, geprägt durch hohen Materialverlust) und erfährt keine äußeren Beanspruchungen. Durch langsames Erwärmen des Vormaterials vor dem Umformprozess kann sich dieser Zunderart ungehindert ausbilden. Diese Zunderart ist deshalb auch massenmäßig am stärksten ausgeprägt. Der Primärzunder wird idealerweise durch einen Hochdruckzunderwäscher oder durch das Vorstauchen der Proben von der Oberfläche entfernt. Erst anschließend bilden sich die beiden anderen Zunderarten chronologisch aus. Für sie sind weniger Masseverluste, bezogen auf das Grundmaterial, charakteristisch, weil die Oxidationszeiten kürzer sind und die Umformtemperaturen sinken. Im Verlauf der Umformung wirken auf die beiden zuletzt genannten Zunderarten unterschiedliche Spannungen ein, was deren Wachstum beeinflusst.

Eigenschaftsbestimmung der einzelnen Zunderbestandteile

Während einer konventionellen Warmumformung lässt sich eine Zunderbildung nicht vollständig vermeiden, weil spätestens in der Transportstufe zwischen Ofen und Zunderwäscher beziehungsweise Ofen und Umformwerkzeug die Metalloberfläche mit dem Luftsauerstoff reagiert und sich Metalloxide aus-

bilden. Eine Abschottung der Anlagen und des Umformgutes vom Sauerstoff als Präventionsmaßnahme ist nur mit hohen Investitionen und erheblichen konstruktiven Mehraufwand möglich, so dass sie in realen Produktionsprozessen kaum realisierbar ist. Aktuell wird angestrebt, die Zunderdicke durch Reduzierung des Sauerstoffpartialdruckes zu minimieren. Damit geht ein geringer Materialverlust einher, was einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung darstellt. Die dünneren Oxidschichten auf dem Umformgut bedingen jedoch grundlegende Anpassungen der weiteren Verarbeitungsstufen, insbesondere hinsichtlich der Möglichkeiten zur Entzunderung sowie des Umformverhaltens. Aus diesem Grund muss die Zunderschicht mit ihren jeweiligen Eigenschaften bei der Auslegung von Verarbeitungsprozessen berücksichtigt werden.

Bei den meisten bisherigen Untersuchungen wurde der Zunder im wiedererwärmten Zustand und als eine Gesamtschicht betrachtet. Das wird allerdings dem Zunder, der aus mindestens drei geschichteten Eisenoxiden mit stark schwankenden Strukturmerkmalen verschiedener chemischer Zusammensetzung und den damit einhergehenden Inhomogenitäten bezüglich der Umformeigenschaften besteht, nicht gerecht.

Das Ziel der eigenen Untersuchungen war, die drei Eisenoxide isoliert und unabhängig voneinander zu untersuchen und ausgewählte

Umformeigenschaften zu ermitteln. Das soll unter Verwendung von reinen Oxidpulvern, die verpresst, wärmebehandelt und anschließend umgeformt werden, möglich sein. An den dabei entstehenden Prüfkörpern könnten die oxidabhängigen Umformeigenschaften bestimmt werden. Durch die Erzeugung unterschiedlicher Prüfkörpergeometrien wurde eine Möglichkeit geschaffen, sowohl im Stauchversuch die Fließspannungen bei erhöhten Umformgeschwindigkeiten zu messen als auch im 3-Punkt-Biegeversuch die kritischen Spannungen für Risswachstum zu untersuchen. Die Rissinitiierung erfolgte, wie es die DN EN ISO 15732 verlangt, über drei symmetrisch aufgebrauchte Vickers-Eindrücke auf der schmaleren Probenseite.

Eigenschaften der Eisenoxide während der Warmumformung

Das Umformverhalten des mehrschichtigen Zunders während der Warmumformung ist in erster Linie vom Grundwerkstoff, dem vorherrschenden Temperaturniveau, von Umformfolge und vom Umformgrad sowie vom Zunderaufbau abhängig [2-8]. Während des Umformens werden die Eisenoxide mit steigenden Temperaturen und kleinen Umformgraden sowie dünnen Schichten plastisch, ohne dass es zu einer durchgängigen Rissbildung kommt, umgeformt [7-8]. Dabei ist das Umformvermögen des Zunders nicht proportional zum Metall, da es mit fortlaufenden Deformationsschritten abnimmt.

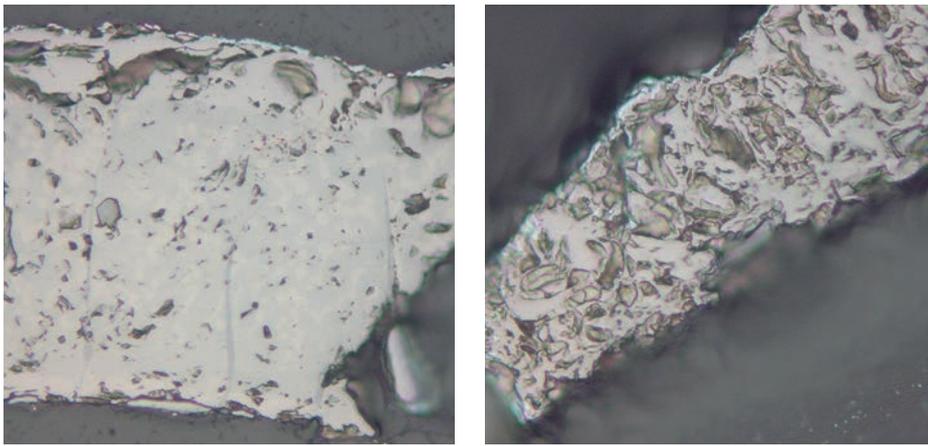


Bild 2: Vergleich zwischen einem einmalig umgeformten ($\varphi = 0,5$; $\dot{\varphi} = 5 \text{ s}^{-1}$) und anschließend weitergewachsenen (links) und einem auf blanker Stahloberfläche bei $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$ entstandenen Zunderfragment (rechts) am Beispiel der Stahlmarke C45, 500-fache Vergrößerung.

Dieses Verhalten bei hohen Temperaturen wird durch die anfänglich vorhandene Porosität bei dicken, nicht umgeformten Oxidschichten noch verstärkt.

Die angesprochenen Poren bilden sich in der Zunderschicht in Abhängigkeit von der Schichtdicke aus und das Porenvolumen bestimmt durch sein Vorhandensein das Eigenschaftsprofil und die Umformbarkeit der Metall-Oxid-Verbindung, weil die Poren als Fehlstellen/Defekte betrachtet werden müssen und damit das Umformverhalten beeinflussen. Für die Entwicklung des Zunders, speziell bei längeren Transport- beziehungsweise Pausenzeiten im Zuge der Umformung, stellt das Porenvolumen somit ein wesentliches Merkmal des Zunders dar. Je kürzer die Zeiten und je niedriger die Umformtemperatur, desto geringer das Gesamtporenvolumen im Zunder. Je länger die Pause und je höher die Materialtemperatur, desto mächtiger und poröser entwickelte sich der Zunder (Bild 1) [7].

Infolge der Umformung findet eine Reduzierung des Porenvolumens statt, sodass eine kompaktere, weniger poröse Zunderschicht entsteht (Bild 2). Durch die Minimierung der Poren entsteht eine Zunderschicht, die nachfolgend weniger verdichtet werden kann und zum Aufbrechen neigt. Somit sinkt das Umformvermögen des Zunders mit zunehmender Anzahl der Umformschritte und Umformgrad, was sich durch die sinkende Temperatur während des Werkzeugkontakts ebenfalls negativ auf die Umformbarkeit des Zunders auswirkt. Diese Ergebnisse zur Porenentwicklung und deren Verhalten bilden die Basis für die Bestimmung der Materialeigenschaften der einzelnen Eisenoxide. Der Schwerpunkt bei der Probenherstellung für die experimentelle Simulation richtete sich darauf, dass im Prüfling eine ähnliche Struktur wie in der realen Zunderschicht vorliegt.

Die Ergebnisse der reinen und unabhängig voneinander betrachteten Eisenoxide mit den genutzten technologischen Bedingungen (maximale Umformgeschwindigkeit 10 s^{-1}) spiegeln auch ansatzweise die Umformbedingungen von Massivumformprozessen wider (Bild 3). Die Ermittlung von Koeffizienten für die Fließkurven der einzelnen Eisenoxide erfolgte mittels Freiburger Fließkurven-Ansatz 8 nach Hensel-Spittel. Die einzelnen Koeffizienten für die drei untersuchten Oxide sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Um die bruchmechanische Kennwerte der einzelnen Eisenoxide zu messen, wurde die Prüfung bei Raumtemperatur unter Normaldruck realisiert. Diese Temperatur wurde ausgewählt, weil durch den Werkzeugkontakt der Zunder kurzzeitig auf die Werkzeugtemperatur abgekühlt wird und Risse in der Zunderschicht entstehen. Die Zundertemperatur sinkt dabei schnell in den Bereich der Raumtemperatur ab. Zusätzlich ist die Prüfung der Proben bei

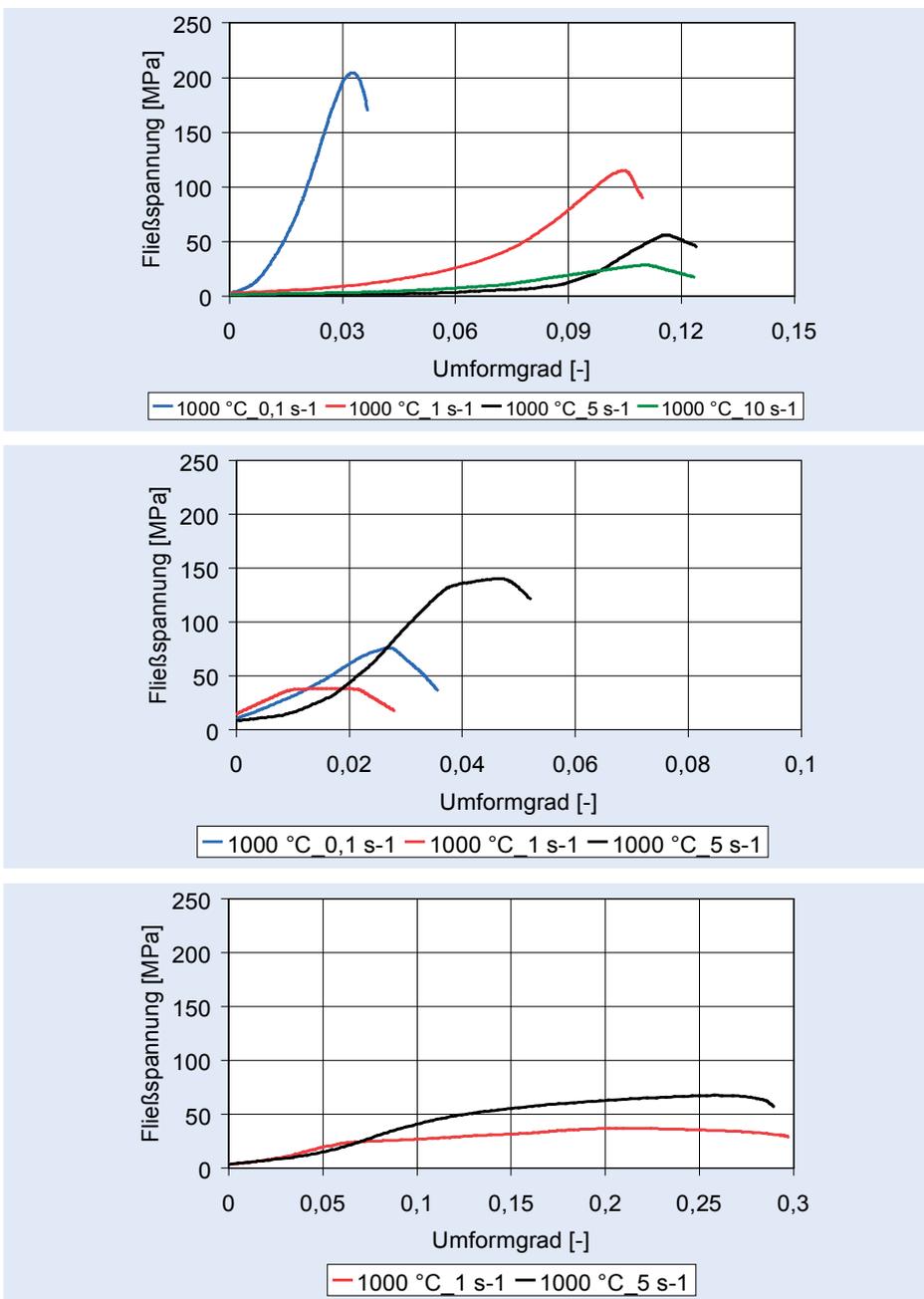


Bild 3: Gemessene Fließkurven der drei Zunderhauptbestandteile bei $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten (oben: Hämatit, mitte: Magnetit, unten: Wüstit).

hohen Temperaturen nicht standardisiert und eine homogene Temperaturverteilung in der Probe kann nicht sichergestellt werden. Je nach Material ergaben sich unterschiedliche Prüfkraft, mit denen unter Zuhilfenahme der DIN EN ISO 15732 die Möglichkeit besteht, bei Berücksichtigung der Probengeometrie und der Bruchflächen, die kritischen Spannungsintensitätsfaktoren Modus I für die Zunderbestandteile zu berechnen (Tabelle 2).

Beim Vergleich der berechneten Spannungsintensitätsfaktoren ist festzustellen, dass sich die K_{IC} -Werte nicht stark voneinander unterscheiden. Das Eisenoxid mit dem geringsten Sauerstoffgehalt besitzt den höchsten Spannungsintensitätsfaktor. Das spiegelt sich bereits auch in der Fließkurve mit dem größten Umformgrad wider.

Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Bestimmungsmethode wird eine Möglichkeit aufgezeigt, mit der die experimentelle Simulation für die im Zunder zu findenden Eisenoxide realisiert werden kann. Durch die detaillierte Charakterisierung des mehrschichtigen Zunders unter Einbeziehung der umformtechnischen Kennwerte kann eine genauere Vorhersage über das Zunderverhalten bei verschiedenen Warmumformverfahren der umzuformenden Stahllegierung getroffen werden. Die ermittelten Materialkennwerte können als Eingabewerte in bestehende numerische Umformsimulationen oder in komplexere mathematische Modellansätze für Warmumformverfahren implementiert werden und beschreiben derartig einen weiteren Baustein in Richtung einer vollständigen Simulation der Warmumformprozesse.

Ein weiterer, noch nicht erfasster Sachverhalt betrifft die Einbeziehung von Zwischenschichten oder Ausscheidungen, die sich infolge des Legierungskonzepts des Stahls herausbilden können. Gegenwärtig wurde die vorgestellte Methodik für weitestgehend unlegierte Stahlgüten validiert. Zur Nutzung von Zwischenschichten oder Ausscheidungen (zum Beispiel $FeCr_2O_4$, Fe_3C , Al_2O_3 et cetera) sind sowohl deren Bildungskinetiken als auch die erforderlichen mechanischen Eigenschaften vonnöten.



Dr.-Ing. Marcel Graf



Prof. Dr.-Ing. Rudolf Kawalla

	Fe_2O_3 (Hämatit)	Fe_3O_4 (Magnetit)	FeO (Wüstit)
A	$232,257 \cdot 10^3$	$113,543 \cdot 10^9$	$1,5248 \cdot 10^6$
m_1	-0,00504732	-0,020166	-0,00835641
m_2	1,16214	0,46793	0,894583
m_3	0	0	0
m_4	$776,578 \cdot 10^{-6}$	$74,227 \cdot 10^{-6}$	$1.718,16 \cdot 10^{-6}$
m_5	$34,7538 \cdot 10^{-3}$	$21,6232 \cdot 10^{-3}$	$1,95354 \cdot 10^{-3}$
m_6	0	0	0
m_7	-333,739	-198,464	-6,83988
m_8	$-585,729 \cdot 10^{-6}$	$-6,69757 \cdot 10^{-6}$	$136,334 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 1: Materialparameter für Fließkurvenberechnung gemäß Ansatz 8.

	Fe_2O_3	Fe_3O_4	FeO
Spannungsintensitätsfaktor Modus I [$MPa \cdot \sqrt{m}$]	1,2	1,6	2,2

Tabelle 2: Berechnete mittlere Spannungsintensitätsfaktoren.

Bilder: Autoren

Literatur

[1] Industrieverband Massivumformung e. V.; Kennzahlen – Produktion, 2013.

[2] Hidaka, Y.; Anraku, T.; Otsuka, N.: Deformation of Iron Oxides upon Tensile Test at 600 – 1250 °C; Oxidation of Metals, Vol. 59, Nos. 1/2, 2003, pp. 97 – 113.

[3] Kawalla, R., Steinert, F.: Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern in der Fertigungsstrasse auf die Tertiärzunderausbildung; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Wiley-VCH Verlag, Volume 38 Issue 1, 2007, pp. 36 – 42.

[4] Krzyzanowski, M.; Beynon, J. H.; Farrugia, D.C.J.: Oxide Scale Behavior in High Temperature Metal Processing; Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2010.

[5] Schütze, Michael: Protective Oxide Scales and Their Breakdown; John Wiley & Sons, Chichester, 1997, ISBN: 0-471-95904-9.

[6] Schwerdtfeger, K.; Zhou, S.: A Contribution to scale growth during hot rolling of steel, Steel Research International 2003, vol. 74 (9), pp. 538 – 548.

[7] Graf, M.; Kawalla, R.: Deformation Behaviour and Mechanical Properties of Oxide Scales during Hot Metal Forming Processes; steel research international – Special Edition 10th ICTP 2011, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2011, pp. 78 – 81; ISBN: 978-3-514-00784-0.

[8] Filatov, Dmitri: Zunder beim Warmwalzen von Stahl: Bildung, Verhalten im Walzspalt und Beizbarkeit; Dissertation, Umformtechnische Schriften Band 131, Shaker Verlag, Aachen, 2006; ISBN 978-3-8322-5482-7.