

## Einfluss von Fließkurven auf die Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs bei der Simulation von Warmumformprozessen

Die Qualität der in der Simulation genutzten Fließkurven spielt eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der geeigneten Umformanlage sowie bei der Preisgestaltung von Schmiedeprodukten. Der nachfolgende Beitrag diskutiert den Einfluss von verschiedenen Faktoren auf die Qualität der Fließkurve und auf die Zuverlässigkeit der berechneten Kräfte. Zudem unterbreitet er praxisnahe Empfehlungen zur Problemlösung sowie Vorschläge zum Einsatz verschiedener an die konkrete technologische Situation angepasster Fließkurvenansätze.

AUTOREN



**Dr.-Ing. Alexander Borowikow**

ist Gründer und Geschäftsführer der Gesellschaft für metallurgische Software- und Technologieentwicklung (GMT) mbH in Bernau bei Berlin



**Doris Wehage**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Gesellschaft für metallurgische Systeme (GMS) mbH in Bernau bei Berlin



**Dr.-Ing. Margarita Bambach**

ist Leiterin der Werkstoffentwicklung bei der Gesellschaft für metallurgische Software- und Technologieentwicklung (GMT) mbH in Bernau bei Berlin

Eine zuverlässige Abschätzung des erforderlichen Kraft- und Arbeitsbedarfs ist eine wesentliche Position in der Kalkulation und Preisgestaltung von Produkten der Warmformgebung. So stehen für die Produktion im Unternehmen in der Regel mehrere Umformaggregate unterschiedlicher Leistungsklassen zur Verfügung, auf denen die gewünschte Geometrie eines bestellten Schmiedeprodukts prinzipiell eingestellt werden kann. Je größer die Anlage, desto höher sind Energieverbrauch und Kosten. Aus diesem Grund versuchen Unternehmen bereits in der vorbereitenden Phase der Preiskalkulation und Prozessplanung, ein Schmiedeerzeugnis einer Umformanlage mit optimalen Leistungsparametern zuzuordnen. Liegt der Kraftbedarf für die Umformung in einem Grenzbereich zwischen zwei Umformanlagen, wird die Entscheidung schwierig. Üblicherweise versuchen Unternehmen dann, den Prozess auf die kostengünstigere Anlage zu legen. Kompliziert wird die Entscheidung, wenn die Fertigung des Schmiedeprodukts nur auf der größten im Unternehmen vorhandenen Umformanlage möglich ist und die Kalkulation des Kraftbedarfs zugleich ergibt, dass dieser sich im oberen Grenzbereich der Leistungsfähigkeit bewegt. Tritt dann nach Vertragsabschluss der Fall ein, dass eine Fertigung doch nicht im eigenen Hause möglich ist, entstehen hohe Kosten für eine Ersatzlieferung.

Die benötigten Umformkräfte, die für die Prozessauslegung und Kostenbestimmung sehr wichtig sind, werden insbesondere bei komplizierten Geometrien des Schmiedeguts mit Hilfe der Finite-Elemente-Simulation bestimmt, einem dafür geeigneten und sehr präzisen Werkzeug. Die Berechnung der Umformkraft basiert im Wesentlichen auf den Faktoren Temperatur,

Umformgrad, Umformgeschwindigkeit, Reibungsverhältnisse und Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück sowie der auftretenden Spannungszustände. Diese komplexen Parameterbeziehungen lassen sich mit modernen FEM-Programmen gut abbilden. Die häufigste Fehlerquelle bei der Kraftberechnung stellen die als Ausgangsinformation bereitgestellten Daten zur Umformfestigkeit des ausgewählten Materials dar. Sie bilden die Umformfestigkeit eines Werkstoffs ab, die in der Regel experimentell im Stauch-, Torsions- oder Zugversuch bestimmt und in eine fiktiv einachsige Spannung zurückberechnet wurde. Es handelt sich um funktionale Abhängigkeiten der Fließspannung von Umformtemperatur, Umformgeschwindigkeit und Umformgrad. Die Ergebnisse werden als Fließkurven für die Temperatur-, Umformgeschwindigkeits- und Umformgradbereiche wiedergegeben, die in der Warmumformung charakteristisch sind, und danach für die Nutzung in den FEM-Berechnungen entweder tabellarisch oder als parametrisierte Funktionen hinterlegt (Bild 1).

Was sind nun die Probleme, die zur oben erwähnten Ungenauigkeit und in vielen Fällen auch Unzuverlässigkeit der Kraftberechnungen führen? In modernen FEM-Simulationsprogrammen ist standardmäßig eine Materialdatenbank hinterlegt, die neben den wärmephysikalischen Kennwerten auch die Fließspannung enthält. Diese können in tabellarischer oder analytischer Form vorliegen. Für den Nutzer des Programms ist das sehr bequem, aber diese Werte sind meist der Literatur entnommen. Häufig fehlen entscheidende Informationen, beispielsweise zum Ausgangszustand des Materials und zum Aufnahmeverfahren. Da an dieser Stelle von der Warmformgebung die Rede ist und

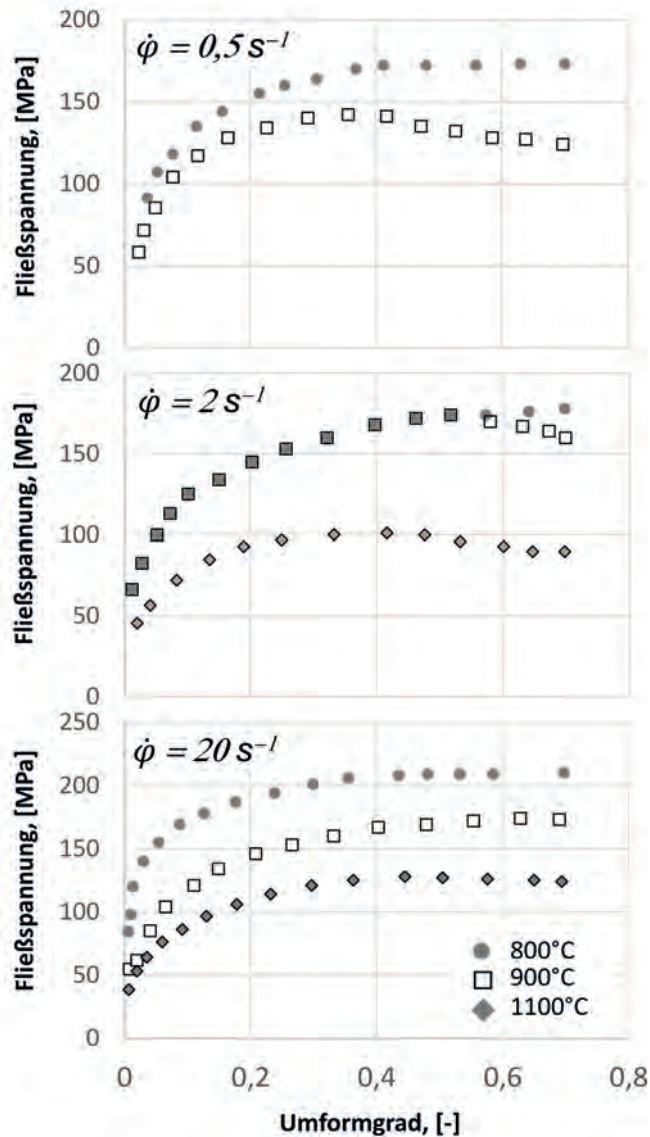


Bild 1: Die Fließspannungsabhängigkeit von der Temperatur und der Umformgeschwindigkeit nach [1]

das Werkstück vor der Umformung auf Umformtemperaturen von 1.100 bis 1.250 °C erwärmt wird, sollten thermische Vorbehandlungs- oder Verfestigungszustände keine wesentliche Rolle spielen. Entscheidend für den Verlauf und das Niveau einer Fließkurve ist jedoch, ob es sich beim Ausgangsmaterial um Gussstrukturen, zum Beispiel Stranggussmaterial, oder um bereits vorumgeformtes Material handelt.

An dieser Stelle können sich die Werte der Fließspannung insbesondere in den ersten Umformschritten um 30 bis 40 Prozent unterscheiden. Eine weitere wesentliche Information, die vorliegen sollte, ist das Aufnahmeverfahren der Fließkurven: Stauch-, Torsions- oder Zugversuch? Zwar wird der grundsätzlich unterschiedliche Spannungszustand, wie bereits beschrieben, aus den Werten der Fließkurve herausgerechnet, aber insbesondere die dynamischen Entfestigungsvorgänge und -effekte, die durchaus bei 10 Prozent der Fließkurvenwerte liegen können, unterscheiden sich bei den Versuchsformen sehr stark. So entfestigt das Material beim Torsionsversuch erheblich eher, was die Lage des Fließspannungsmaximums verfälschen kann. Nicht zuletzt spielt das Archivierungsverfahren der Fließkurven in der Datenbank eine Rolle. Sind tabellarische Werte hinterlegt, so hat es den Vorteil, dass es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um die Werte aus der Versuchsaufnahme handelt. Hier ist darauf zu achten, dass die Werte für den geplanten Umformtemperatur- und Geschwindigkeitsbereich nicht zu große Abstände aufweisen. Bei der Temperatur sollten die Schritte nicht größer als 50 °C sein. Bei der Umformgeschwindigkeit sollten die Versuchsaufnahmebereiche und die Praxisparameterbereiche konform sein.

Es ist in jedem Fall darauf zu achten, dass überhaupt eine Abhängigkeit der Fließkurven von der Umformgeschwindigkeit hinterlegt ist. Ist das nicht der Fall, so ist mit erheblichen Fehlern zu rechnen, was aus den in Bild 1 dargestellten Fließkurven für verschiedene Geschwindigkeiten gut erkennbar ist. Sind die Werte also tabellarisch hinterlegt, so sollte der Parameterraum möglichst dicht besetzt sein. Von Vorteil sind mindestens hundert Werte aufwärts, denn das FEM-Programm greift auf diese Werte zu und interpoliert mit unterschiedlichen Ansätzen, um in einem jeden Inkrement der Berechnung einen Fließkurvenwert für die konkrete Temperatur, Umformgeschwindigkeit und den berechneten Umformgrad zu erhalten. In diesem Falle gilt: Je dichter die Werte sind, desto besser das Ergebnis.

Bleibt noch die Fließkurve, die in Form einer parametrisierten Funktion hinterlegt ist. Der große Vorteil besteht darin, dass nicht mehr zwischen Punkten interpoliert werden muss, sondern ein kontinuierliches Bild im Parameterbereich entsteht, auf das der FEM-Algorithmus zugreifen kann. Alles hängt davon ab, wie gut die benutzte analytische Funktion den Verlauf der Kurven tatsächlich abbildet, welche Datenbasis zugrunde liegt und wie der gewünschte Parameterbereich abgedeckt wird. In der Regel lässt sich das gut beurteilen, indem man sich die Funktion für den Parameterraum, in dem man sie nutzen möchte, in einem EXCEL-Blatt visualisiert. Dabei ist wichtig, dass es eine Abhängigkeit vom Umformgrad, der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit gibt. Handelt es sich um einen einstufigen, kontinuierlichen Prozess im Bereich relativ niedriger lokaler Formänderungen, so kann man unter Berücksichtigung der oben angegebenen Parameter mit guten Resultaten rechnen.

taten in Bezug auf die Berechnung der benötigten Umformkräfte rechnen. Ein Beispiel für einen entsprechenden Ansatz ist in Formel 1 dargestellt [2]:

$$\sigma_F = A \cdot e^{m_1 \cdot \vartheta} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{m_4/\varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_3}$$

In der Regel liegen beim Schmieden große lokale Formänderungen, unterbrochene Prozesse und eine Umformung bis in niedrige Temperaturen hinein vor. Häufig wird in lokalen Bereichen des Umformguts ein logarithmischer Umformgrad von  $\varphi \geq 0,6$  erzielt. In diesen Bereichen treten bei vielen Stählen dynamische Entfestigungsvorgänge auf. Das führt zu einem teilrekristallisierten Gefüge bereits im laufenden Umformschritt, im Ergebnis tritt ein Entfestigungseffekt mit der damit verbundenen Abnahme der erforderlichen Umformkräfte ein. Dieser Effekt kann durchaus zu Absenkungen im Bereich von 5 bis 8 Prozent der maximalen Fließspannung führen und so ermöglichen, den Umformprozess mit der zur Verfügung stehenden Presskraft durchzuführen.

Moderne Fließkurvenansätze können das Phänomen abbilden, und sie sollten deshalb auch genutzt werden (Formel 2, GMT Funktion):

$$\sigma_F = c_1 \cdot e^{(c_2 \cdot \vartheta)} \cdot \varphi^{(n_1 \cdot \vartheta + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{l_1 \cdot \vartheta + l_2}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_1 \cdot \vartheta + n_2)}$$

Handelt es sich um unterbrochene Umformvorgänge ohne Zwischenerwärmung, zum Beispiel um Hübe einer Schmiedepresse oder Schläge eines Hammers mit einem Zeitabstand zwischen den Hüben/Schlägen, so kann in Abhängigkeit vom Zeitabstand und der Temperatur des Umformguts eine statische Teilrekristallisation und die damit verbundene Entfestigung des Gefüges auftreten. Erfahrene Anlagenbediener machen sich diesen Effekt häufig zunutze, indem sie zwischen zwei Hüben oder Schlägen einfach einen Zeitraum warten.

Grundsätzlich wird dieser Effekt mit Hilfe von Gefügemodellen in der Simulation abgebildet. Anhand von integrierten semiempirischen Modellen wird der aktuelle Gefügezustand berechnet und dessen Einfluss auf das Verhalten der Fließkurve übertragen. Die Nutzung derartiger Modelle ausschließlich zur Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs ist wegen der hohen Kosten unwirtschaftlich. Sinnvoll ist der Einsatz derartiger Modelle, wenn man Gefügezustände, Korngrößen und mechanische Eigenschaften im Ergebnis des Umformprozesses erkennen möchte.

Es gibt einen einfachen und kostengünstigen Weg, die entfestigenden Einflüsse auch in der Fließkurve zu berücksichtigen. So können die Beobachtungen der Anlagenbediener zum Einfluss auf die Umformung kombiniert mit der Temperatur des Schmiedeguts und der Pausenzeit sowie die eingetre-

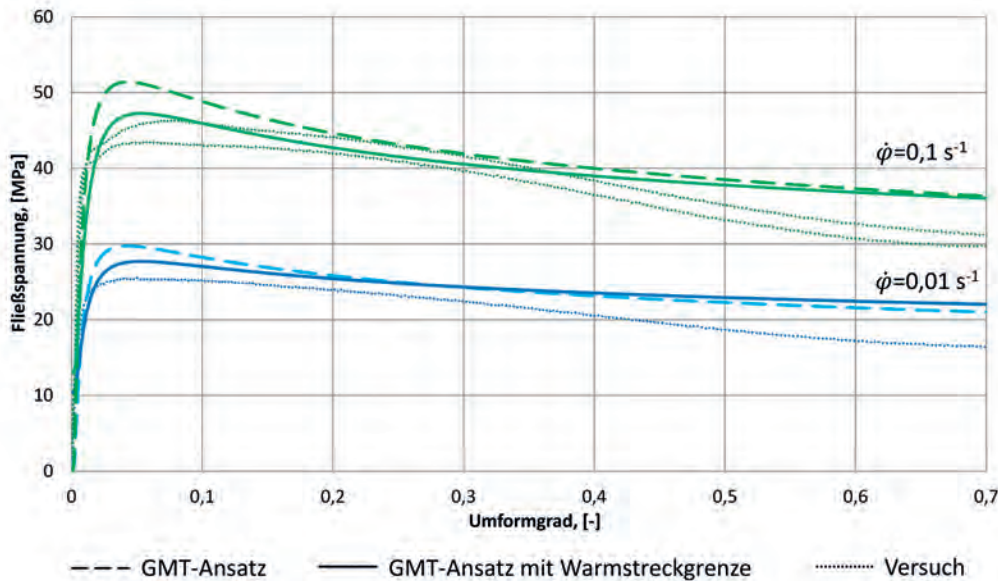


Bild 2:TiAl6V4-Fließkurven bei 1.000 °C: gemessen und berechnet [3]  
 Bilder: Autoren

tenen Formänderungen für mehrere Zeitschritte aufgezeichnet werden. Diese Informationen werden dann in einem zusätzlichen Berechnungsterm der Fließkurvenfunktion berücksichtigt, und sie beschreiben den Effekt mit guten Ergebnissen. GMT hat bereits mit mehreren Industriepartnern eine derartige Fließkurvenadaption mit sehr zufriedenstellenden Ergebnissen durchgeführt. Selbst bei Hämmern mit 20 und mehr Schlägen wurde über die Einbindung dieses zeitabhängigen Effekts die zur Füllung des Gesenks erforderliche Schlaganzahl gut getroffen.

Je länger ein Umformprozess dauert, desto stärker kühlt das Material ab. Dies führt zu stärkerem Einfluss der Warmstreckgrenze und damit des Moments des Fließbeginns. Leider wird in fast allen analytischen Fließkurven eben diese Warmstreckgrenze nicht berücksichtigt. Bei einer Formänderung  $\varphi = 0$  beträgt in der Regel auch die aus der Funktion errechnete Spannung 0 MPa. Die unterschiedlichen Anbieter von FEM-Programmen legen häufig einen festen Startwert für die Fließspannung bis zu einem definierten minimalen Umformgrad fest. Das führt zu Ungenauigkeiten insbesondere bei kleinen Umformgraden. Auch die aus der Literatur entnommenen tabellarisch hinterlegten Fließkurven bilden in den meisten Fällen keine Warmstreckgrenze ab.

Die Warmstreckgrenze ist vorrangig temperaturabhängig, bei ausgewählten Werkstoffen besteht eine spürbare Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit. Nähert sich eine mehrstufige Umformung dem Endstadium bei relativ niedrigen Temperaturen und kleinen Formänderungen, kann es durchaus sein, dass gar kein Fließbeginn einsetzt, da die Warmstreckgrenze nicht überschritten wird. Dieser spezielle Fall sollte auch mit der Kraftsimulation erkannt werden. Aus diesem Grund hat die GMT mbH einen erweiterten analytischen Fließkurven-

ansatz entwickelt, in dem ein Glied zur Berechnung der Warmstreckgrenze enthalten ist (Formel 3, GMT-Formel mit Warmstreckgrenze):

$$\sigma_F = R_p + c_1 \cdot e^{(c_2 \cdot \dot{\varphi})} \cdot \phi^{(n_1 \cdot \dot{\varphi} + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{l_1 \cdot \dot{\varphi} + l_2}{\phi}\right)} \cdot \phi^{(m_1 \cdot \dot{\varphi} + m_2)}$$

Wird in diesem Ansatz die Formänderung auf Null gesetzt, so ergibt sich für die ausgewählte Temperatur der Wert der Warmstreckgrenze. Bild 2 ist stellt als Beispiel die Anpassung der Fließkurvenfunktion (2) und (3) an experimentelle Daten dar.

Dieser Ansatz hat sich in der Praxis bereits für sehr viele Materialien im Einsatz in Grobblechwalzwerken bewährt. Insbesondere in der sogenannten Kalibrierungsphase mit sehr geringen Stichabnahmen und bei niedrigen Temperaturen ist es von besonderer Bedeutung, eine zuverlässige und genaue Aussage zu den zu erwartenden Walzkräften zu erhalten. Denn über diese Voraussage wird der Endwalzspalt eingestellt, und die Auffederung des Walzensystems muss dabei unbedingt berücksichtigt werden. Insofern ist es auch für die Vorausberechnung von Präzisionsschmiedeprozessen oder beim Ringwalzen sinnvoll zu wissen, wie sich der Werkstoff bei niedrigen Temperaturen und kleinen Verformungen verhält.

Die wesentlichen Faktoren, auf die bei der Arbeit mit Fließkurven zur zuverlässigen Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs geachtet werden muss, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zuverlässige Ausgangsdaten nutzen aus abgesicherten Versuchen mit Angaben zur Aufnahmetechnik und dem eingesetzten Material (Stauch- oder Torsionsversuch, eventuell Zugversuch, Gussmaterial/vorverformt) oder aus der Literatur, dann unbedingt mit Angabe der Quelle.

## AUS DER PRAXIS

- Die Fließkurvendaten müssen unbedingt den Parameterbereich in Bezug auf Temperatur, Geschwindigkeit und Umformgrad für die im Unternehmen genutzte Technologie/Anlagentechnik abdecken.
- Zu einer hinterlegten analytischen Funktion gehört immer eine Angabe zum Parameterbereich der Daten, auf deren Basis die Funktion approximiert wurde, und ein Parameterbereich, für den der Lieferant der Funktion eine zuverlässige Voraussage ermöglicht.
- Vor Einsatz der Fließkurvenfunktion sind Testberechnungen für unterschiedliche Punkte des für die Umformtechnologie ausgewählten Parameterbereichs sinnvoll, um diese analytisch erhaltenen Werte auf ihre Plausibilität zu überprüfen.
- Um die Möglichkeiten der Anlagentechnik erschöpfend auszunutzen, sollten die Anteile der dynamischen und statischen Rekristallisation berücksichtigt werden.
- Zur Berücksichtigung der Einflüsse der statischen Rekristallisation/Entfestigung ist nicht unbedingt ein Gefügemodell erforderlich. Beobachtungen und eine erweiterte Fließkurvenfunktion erfüllen die Aufgaben an dieser Stelle ebenfalls, sie sind nicht so kostenaufwendig und auch individuell auf die Umformanlage und das eingesetzte Material ausgerichtet.
- Bei Aussagen zu kleinen Umformgraden bei niedrigen Temperaturen (zum Beispiel das Fließverhalten des Stegs) sind die Kenntnisse der Warmstreckgrenze von Nutzen. Hierzu hat die GMT einen speziellen Ansatz entwickelt.



[1] Poluchin, P.I.; Gun, G.J.; Galkin, A.M.: Soprotivlenije plasticheskoj deformazii metallov i splavov. Isdatjelstvo Metallurgii, Moskau 1983

[2] Hensel, A.; Spittel, Th.: Kraft-und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978

[3] ProFIT Projekt GMS mbH + BTU Cottbus KuF  
Entwicklung von Simulationssoftware mit intelligenten Datenstrukturen für die Prozessauslegung von Warmumformprozessen für Hochtemperaturwerkstoffe



GMT Gesellschaft für metallurgische  
Technologie- und Softwareentwicklung mbH  
Börnicker Chaussee 1 – 2  
16321 Bernau  
Telefon: +49 3338 334218-0  
E-Mail: info@gmt-berlin.com  
Internet: www.gmt-stahl.de