

Größeneffekte beim Walzen von Mikrobändern aus Kupferdraht

van Putten, K. (1)

Überall im täglichen Leben kann ein anhaltender Trend zur Miniaturisierung und gleichzeitigen Integration von zusätzlichen Funktionen beobachtet werden. Hierdurch entsteht unter anderem eine zunehmende Nachfrage nach schmalem und sehr dünnem Kupferbandmaterial – so genanntes Mikrobänd.

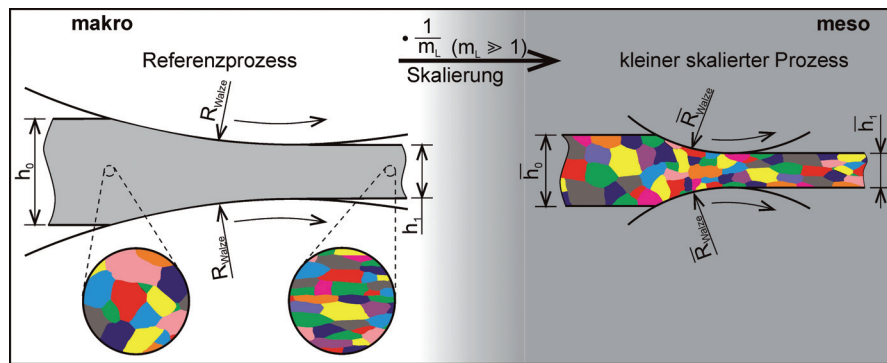


Bild 1: Skalierung des Kupferdrahtflachwalzprozesses vom makroskopischen in den mesoskopischen Bereich.

Mikrobänd aus Kupfer und Kupferlegierungen wird hergestellt durch Flachwalzen eines runden Kupferdrahtes. Dazu wurde der Kupferdrahtflachwalzprozess vom makroskopischen in den mesoskopischen Bereich skaliert (siehe Bild 1). Bei der Miniaturisierung des Kupferdrahtflachwalzprozesses treten Größeneffekte auf, die das Prozess- und Materialverhalten beeinflussen. Die Größeneffekte wurden in der hier vorgestellten Arbeit identifiziert und quantifiziert. Die Erfassung der auftretenden Größeneffekte soll zukünftig die Optimierung des miniaturisierten Drahtflachwalzprozesses zur Herstellung von hochwertigen Mikrobändern ermöglichen.

Zur Ermittlung der Größeneffekte beim Walzen von Mikrobändern wurde der Kupferdrahtflachwalzprozess selbst sowie der Flachstauchversuch, eingesetzt als physikalische Simulation des Walzprozesses, aus dem makroskopischen in den mesoskopischen Bereich skaliert. Der mesoskopische Bereich ist der Übergangsbereich zwischen makro-

ro- und mikroskopisch; die Größen der charakteristischen Abmessungen liegen zwischen 1,00 und 0,01 mm. Die Größeneffekte offenbaren sich

durch Unterschiede in Material- und Prozessverhalten zwischen dem makroskopischen Referenzprozess und dem skalierten, verkleinerten Prozess. Die Experimente werden von analytischen Modellen und Finite-Elemente-Simulationen unterstützt.

Größeneffekte

Die Untersuchungen zeigen, dass Größeneffekte einen erheblichen Einfluss auf den miniaturisierten Flachstauchversuch und den verkleinerten Kupferdrahtflachwalzprozess zur Mikrobänderherstellung haben. Mit fortschreitender Miniaturisierung werden beide Prozesse zunehmend von zwei unterschiedlichen Größeneffekten beeinflusst.

Erstens werden die Prozesse durch Größeneffekte im Fließverhalten beeinflusst. Mit einer Miniaturisierung ändert sich das Verhältnis von Korndurchmesser (d_k) zu charakteristischer

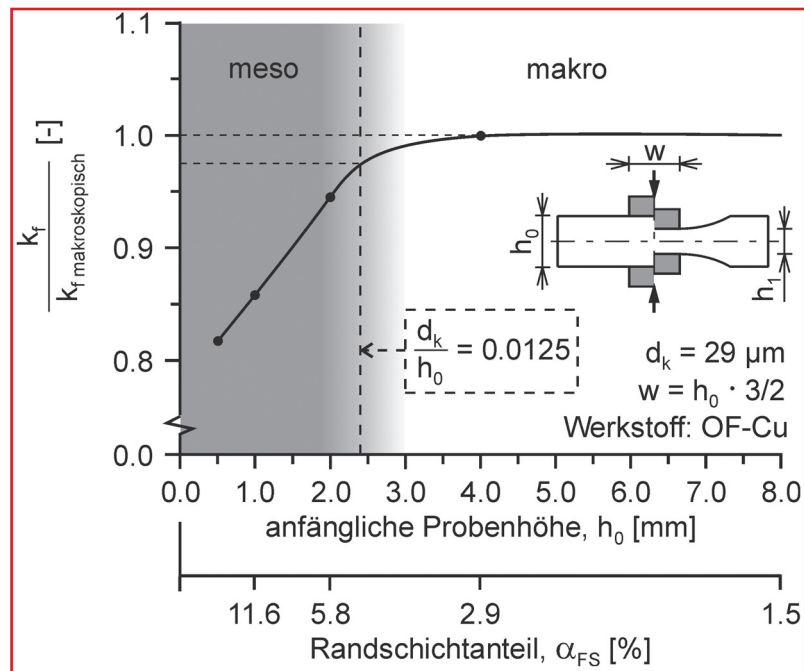


Bild 2: Schematische Darstellung der normalisierten Fließspannung ermittelt an OF-Cu Proben mit konstanter Korngröße (d_k) von 29 μm in geometrisch ähnlich verkleinerten Flachstauchversuchen.

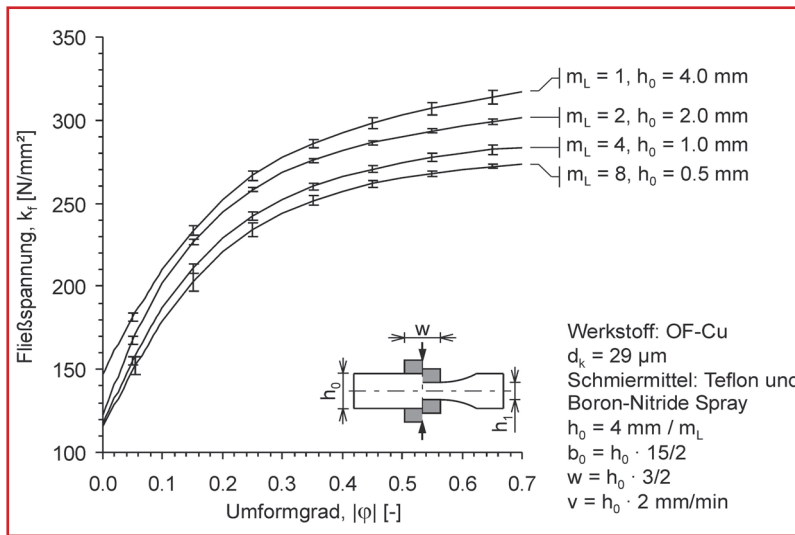


Bild 3: Fließspannung ermittelt an OF-Cu Proben mit konstanter Korngröße (d_k) von 29 µm in geometrisch ähnlich verkleinerten Flachstauchversuchen.

Probenabmessung. Eine Vergrößerung der Korngröße bei konstanten Probenabmessungen führt zu einer Abnahme der Fließspannung (k_f) gemäß dem Hall-Petch-Effekt. Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass die Verfestigung ebenfalls von der Korngröße beeinflusst wird.

Miniaturisierung bei konstanter Korngröße führt aber ebenfalls zu einer Abnahme der integralen Fließspannung (siehe Bild 2). Diese Abnahme wird dem zunehmenden Anteil von freien Oberflächenkörnern, dem sogenannten Randschichtanteil (α_{FS}) zugeschrieben.

Zweitens werden die Prozesse durch Größeneffekte im Reibverhalten unter Mischreibungsverhältnissen beeinflusst. Diese Größeneffekte werden von der Oberflächentopographie verursacht. Da die Oberflächentopographie in der Regel nicht unter Einhaltung der Ähnlichkeit kleiner skaliert wird, ändert sich mit der Miniaturisierung das Verhältnis von offenen zu geschlossenen Schmiertaschen in der Umformzone. Der Anteil der offenen Schmiertaschen sowie die Reibung steigen mit kleiner werdenden Probengrößen an.

Der Flachstauchversuch wurde erfolgreich zur Fließkurvenaufnahme und

physikalischen Simulation des Walzprozesses eingesetzt. Bei der Miniaturisierung des Flachstauchversuches treten oben genannte Größeneffekte im Fließverhalten sowie bei der Reibung eindeutig auf.

Die zwei Arten von Größeneffekten beeinflussen auch die aus dem makroskopischen in den mesoskopischen Bereich skalierten Kupferdrahtflachwalzexperimente. Allerdings ist es aus technischen Gründen in dem hier durchgeführten Kupferdrahtflachwalzexperiment nicht möglich, eine exakte geometrische Ähnlichkeit beizubehalten, denn die Durchmesser der Walzenrollen (D_{Walze}) mussten konstant gehalten werden. Die Einflüsse der geometrisch unvollständigen Skalierung wurden bei der Analyse der Versuchsergebnisse zur Ermittlung von Größeneffekten beim Kupferdrahtflachwalzen betrachtet.

Fließspannung

Sowohl für den Flachstauchversuch als auch für den Kupferdrahtflachwalzprozess wirken sich die Änderungen der Korngröße bei konstanten charakteristischen Probenabmessungen in gleicher Weise aus. Die Fließspannung im Flachstauchversuch und der Umformwiderstand im Drahtflachwalzprozess nehmen beide mit zunehmender Korngröße ab. Die Auswirkungen einer zunehmenden Korngröße auf den Umformwiderstand des Kupferdrahtflachwalzprozesses ist aber weniger ausgeprägt als die auf die Fließspannung ermittelten Auswirkungen aus dem Flachstauchversuch.

Im Flachstauchversuch sowie im Kupferdrahtflachwalzprozess ergibt sich aus dem Verkleinern der charakteristischen Probenabmessungen bei konstanter Korngröße eine Abnahme der integralen Fließspannung (siehe Bild 3).

Aufgrund der nicht eingehaltenen geometrischen Ähnlichkeit bei den durchgeführten Drahtflachwalzexperimenten können die mit kleiner werdenden charakteristischen Probenabmessungen auftretenden Änderungen des Umformwiderstandes (k_w) beim Drahtflachwalzen nicht direkt mit der Abnahme der Fließspannung im

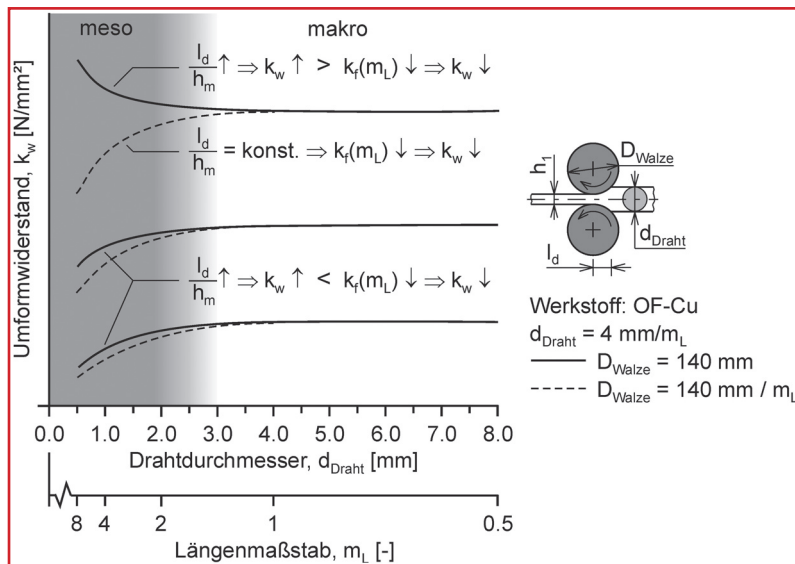


Bild 4: Qualitative, schematische Darstellung der Einfluss des Drahtdurchmessers (d_{Draht}) auf dem Umformwiderstand (k_w) in kleiner skalierte Drahtflachwalzexperiment bei konstanter Korngröße.

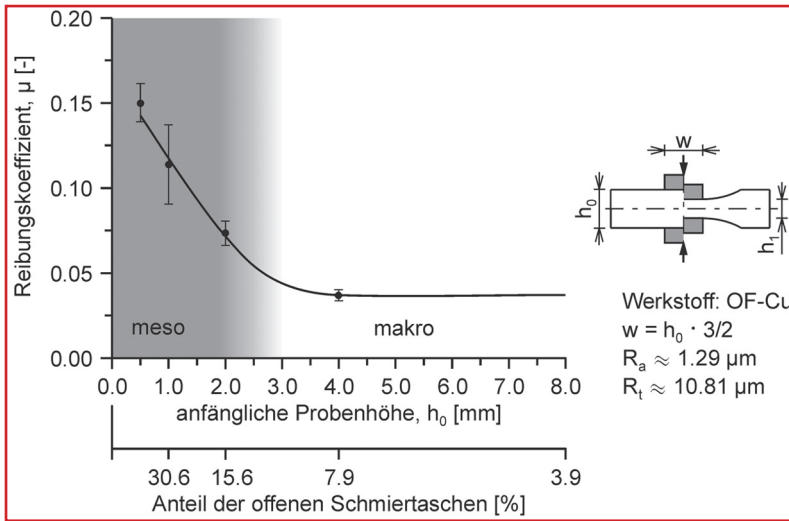


Bild 5a: Skalierungseffekte in der Reibung unter Mischreibverhältnisse ermittelt in geometrisch ähnlich verkleinerten Flachstauchversuchen.

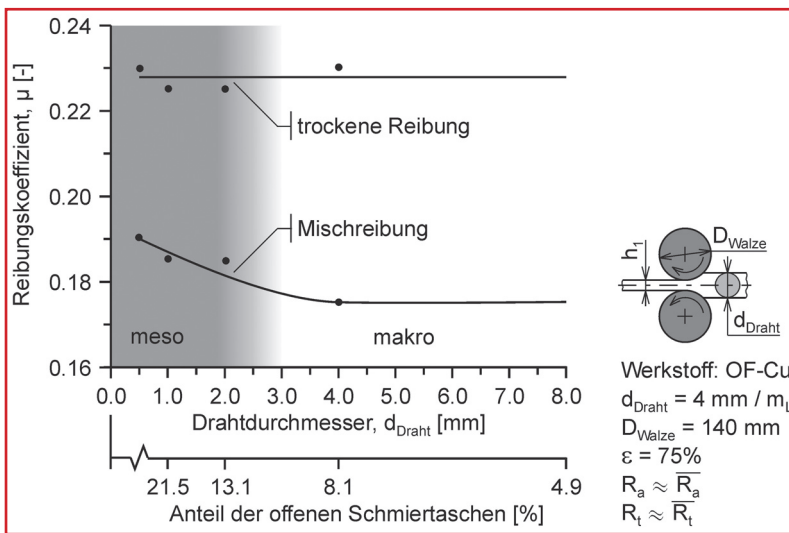


Bild 5b: Skalierungseffekt in der Reibung ermittelt in kleiner skaliertem Drahtflachwalzexperiment.

Flachstauchversuch verglichen werden. Denn der Umformwiderstand im Drahtflachwalzen ist mit abnehmendem Drahtdurchmesser nicht nur von der abnehmenden Fließspannung - verursacht durch den zunehmenden Anteil von freien Oberflächenkörnern - abhängig, sondern auch von der gegensätzlich wirkenden Zunahme des Fließwiderstandes - verursacht durch eine Zunahme des Walzspaltverhältnisses (l_d/h_m) (siehe Bild 4). Bei mittlerer oder geringer Reduktion ist der Einfluss des Walzspaltverhältnisses von untergeordneter Bedeutung und der Umformwiderstand nimmt mit abnehmendem Drahtdurchmesser ab. Wenn aber die Reduktion hoch

ist, steigt der Umformwiderstand mit abnehmendem Drahtdurchmesser aufgrund der Zunahme des Walzspaltverhältnisses und der hiermit verbundenen Zunahme des Fließwiderstandes an.

Reibung

Sowohl für den Flachstauchversuch (siehe Bild 5a) als auch für den Drahtflachwalzprozess (siehe Bild 5b) wurde anhand von verkleinerten Experimenten nachgewiesen, dass der Reibungskoeffizient (μ) unter Mischreibbedingungen mit abnehmender charakteristischer Probenabmessung zunimmt. Im geometrisch ähnlich verkleinerten

Flachstauchversuch steigt der Anteil von offenen Schmieraschen wesentlich stärker als in den Kupferdrahtflachwalzversuchen, in denen die geometrischen Ähnlichkeiten aus technischen Gründen nicht eingehalten werden konnten. Demzufolge ist die Zunahme des Reibungskoeffizienten mit fortschreitender Miniaturisierung beim kleiner skalierten Flachstauchversuch viel größer als beim verkleinerten Drahtflachwalzprozess.

Schlussfolgerung

Die ermittelten Größeneffekte im Fließverhalten und im Reibverhalten sollen bei zukünftigen Optimierungen des Kupferdrahtflachwalzprozesses zur Herstellung von Mikrobändern aus Kupfer oder Kupferlegierungen berücksichtigt werden.

Danksagung

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung dieser Arbeiten im Rahmen des Projektes DFG KO579/71-2, KO579/71-2 und FR2089/2-3: „Auslegung und Herstellung von schmalen Mikrobändern – Miniaturisierung des Walzprozesses bezüglich Dicke und Breite“. Ebenso gilt mein Dank der Firma Prymetall aus Stolberg für die Bereitstellung ihrer Präzisionsdrahtflachwalzanlage und der Firma Wieland für das zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial.

Der Autor bedankt sich herzlich für die Anerkennung der in dieser Veröffentlichung zusammengefassten Forschungsergebnisse durch den Innovationspreis des Deutschen Kupferinstituts.

1) Dr.-Ing. Koos Putten, SMS Meer GmbH, Ohlerkirchweg 66, 41069 Mönchengladbach / Deutschland, koos.vanputten@sms-meer.com

METALL
 contact the editor:
 kammer@metall-news.com