

Diss. ETH No. 21667

Vibration Assisted Guillotining of Stacked Thin Material

A thesis submitted to the
ETH ZURICH

to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
KARL-ROBERT DEIBEL
MSc ETH, Zurich
born March 2nd 1985
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Konrad Wegener, examiner
Prof. Dr. Pavel Hora, co-examiner

2014

Abstract

Cutting stacked thin material, is a separation process that requires in-depth process perfection and optimized tools. Reducing cutting forces can be of key interest in perfecting the cutting process and expanding its capabilities. For the pulp and paper industry, the guillotining of stacked sheets is an essential finishing process. Adding vibrations to the cutting edge may significantly improve the separation process by reducing cutting forces. With two sources of energy acting together at the tool-workpiece interface, this becomes a hybrid process. In this dissertation, one numerical and two analytical models are developed to predict cutting forces during longitudinal vibration assisted cutting and lateral vibration assisted cutting of stacked thin material. While the first is a discontinuous conventional process, the latter adds a slicing motion to the conventional push cutting. The resulting cutting forces of these two hybrid processes are discussed in detail. It is shown that the force reduction due to longitudinal vibration is mainly a phony effect, because the specific energy necessary for material separation stays unchanged. Thus, the cutting forces at the tool-workpiece interface are not reduced. However, the increased damping force between the cutting knife and workpiece causes the stacked material to fail at lower compression. The force reduction occurring during lateral vibration is valid from an energy and fracture mechanic point of view. Reduced friction effects between cutting edge and sheet material are the significant contributors towards overall force reduction during slicing. The energy based model considers the cutting process without any leading crack as a combination of push cutting and slicing. Cutting and friction forces are overcome by the energy provided from both translatory motions. On the contrary, the fracture mechanics model considers the slice-push cutting with a leading crack during sideways cutting of stacked sheets. It is shown that the slicing motion helps overcoming friction effects, but material failure is only due to mode I, leaving the slicing motion without any effect on the separation process. All three models are capable of closely predicting the cutting forces during the separation process of stacked thin paper material. To test the vibration assisted cutting processes at high frequency, two cutting knives for ultrasonic vibration assisted cutting are designed with a newly developed optimization methodology. The new optimization methodology allows the design of complex tools requiring a specific resonance mode at a specific resonance frequency. Finally, the presented models are verified through experiments, which highlights their accuracy.

Kurzfassung

Schneiden von dünnen gestapelten Materialien ist ein Trennprozess, der tiefgehende Prozesskenntnisse und optimierte Werkzeuge voraussetzt. Guillotinieren von gestapelten Papierlagen gilt als zentraler Endprozess in der Papierindustrie. Die Einsatzmöglichkeiten des Schneidprozesses werden durch die Reduktion von Schneidkräften erweitert. Die Überlagerung von Vibrationen an der Schneidkante kann den Trennprozess signifikant beeinflussen und so eine Reduktion von Schneidkräften bewirken. Durch das Zusammenspiel zweier Energiequellen an der Werkzeug-Werkstück Schnittstelle entsteht ein Hybridprozess. In dieser Dissertation werden drei Modelle, ein dynamisches und zwei analytische, entwickelt, um die auftretenden Schneidkräfte beim longitudinalen vibrationsunterstütztem Schneiden und lateralen vibrationsunterstütztem Schneiden vorherzusagen. Während das erste Modell eine Abbildung eines diskontinuierlichen konventionellen Prozesses ist, fügt das zweite Modell eine weitere translatorische Bewegung dem konventionellen Drückschneiden bei. Die resultierenden Schneidkräfte dieser Hybridprozesse werden im Detail in der Dissertation diskutiert. Es stellt sich dabei heraus, dass die Schneidkraftreduktion beim longitudinalen vibrationsunterstützten Schneiden eine Täuschung ist, da die spezifische Energie unverändert bleibt. Aus diesem Grund wird die effektive Schneidkraft an der Werkzeug-Werkstück Schnittstelle nicht reduziert. Allerdings führt die hohe Relativgeschwindigkeit und deren Dämpfungskraft zum verfrühten Versagen des Materials, wodurch die vorangehende Kompression reduziert wird. Die Schneidkraftreduktion beim lateralen vibrationsunterstützten Schneiden ist eine tatsächliche Reduktion in Anbetracht der notwendigen Trennenergie bzw. Bruchenergie. Die Reduktion der Reibeffekte zwischen Schneidkante und Bogenmaterial liefert dabei einen signifikanten Beitrag zur gesamten Schneidkraftreduktion während des Ziehschneidens. Das analytische, auf Energie basierende Modell betrachtet den Ziehdrückschneidprozess ohne Rissausbreitung als eine Kombination aus Drückschneiden und Ziehschneiden, wobei beide translatorische Bewegungen die notwendige Energie für das Trennen des Materials liefern. Im Gegensatz dazu prognostiziert das bruchmechanische Modell ein Versagen des Werkstücks unter Rissausbreitung beim seitlichen Schneiden. Es wird gezeigt, dass die Ziehbewegung die Reibung reduzieren kann, aber das Material ausschliesslich auf Grund von Modus I versagt, wodurch die Ziehbewegung keinen Einfluss auf den Trennprozess hat. Alle drei Modelle sind fähig die auftretenden Schneidkräfte sehr genau vorherzusagen. Um das vibrationsunterstützte Schneiden bei hohen Frequenzen experimentell zu testen, müssen zwei Schneidmesser für den Resonanzbetrieb mittels eines neu entwickelten Optimierungsprozesses ausgelegt werden. Die neue Optimierungsmethodik für Ultraschallbauteile erlaubt die Konstruktion von neuen komplexen Bauteilen im Resonanzbetrieb. Zum Schluss werden die entwickelten Modelle mittels experimenteller Verifikation getestet, wodurch deren Genauigkeit hervorgehoben wird.