



Editor: Wojciech Zębala

Project of cover: Łukasz Ślusarczyk, Grzegorz Struzikiewicz

Text arrangement: Grzegorz Struzikiewicz

All rights reserved. No part of this study may be reproduced in any form without permission from the editor.

© Copyright by Cracow University of Technology, Cracow 2011

ISBN 978-83-7242-640-6

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej
ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel. 12 628 37 29

Table of Contents

Preface	5
Part 1. Surface Topography & Roundness Analysis	7
Chapter 1.1 Ann, prediction of input parameters during PMMA laser micro-machining – by <i>Sýkorova L., Sámek D., Tomas Bata University in Zlin</i>	9
Chapter 1.2 Shape accuracy and roughness researches of hard turning parts – by <i>Otko T., Zębala W., Matras A., Cracow University of Technology</i>	19
Part 2. CAD/CAE/CAM Techniques	31
Chapter 2.1 Investigation of rough milling in CAM environment – by <i>Balázs M., Obuda University in Budapest</i>	32
Chapter 2.2 Stiffness analysis of machine C-frame using CAD/CAE technique – by <i>Bilek O., Lukovics I., Hrdina J. Tomas Bata University in Zlin</i>	41
Part 3. CNC Machining	49
Chapter 3.2 Design of robot pneumatic gripper for CNC lathe – by <i>Sámek D. Lukovics I., Bilek O., Tomas Bata University in Zlin</i>	51
Chapter 3.3 Trends in workpiece measurement tools in CNC machining – by <i>Sioma A., Struzikiewicz G., AGH, Cracow University of Technology</i>	61
Part 4. Machining of Difficult-To-Cut Materials	77
Chapter 4.1 High speed cutting (HSC) as one of the current trends of difficult-to-cut materials machining - by <i>Otko T., Zębala W., Kundrak J., Cracow University of Technology, University of Miskolc</i>	79
Chapter 4.2 Chip compression ratio analysis after Ti6Al4V machining – by <i>Kowalczyk M., Cracow University of Technology</i>	89
Chapter 4.3 High speed camera application in machining – by <i>Słodki B., Cracow University of Technology</i>	100
Part 5. Modelling and Simulation Technique in Manufacturing	113
Chapter 5.1 Modelling of composite materials machining – by <i>Zębala W., Cracow University of Technology</i>	115
Chapter 5.2 FEM application for productive highspeed grinding – by <i>Bilek O., Lukovics I., Sámek D., Tomas Bata University in Zlin</i>	129

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

Chapter 5.3 Influence of some kinematic and geometrical parameters of spur gears on the characteristics of the hertzian contact – by <i>Ripa M., Teodor V., University “Dunarea de Jos” of Galati</i>	139
Part 6. Non Traditional Machining	149
Chapter 6.1 G code converter cooperating with Cad/Cam software– by <i>Ślusarczyk Ł., Cracow University of Technology</i>	151

PREFACE

Machining is one of the most popular technique to change shape and dimensions of the objects. Machining operations can be applied to work metallic and non-metallic materials such as ceramics, composites, polymers, wood.

Cutting tools have been used since ancient times to remove excess material from forgings and castings. Nowadays, metal cutting became one of the primary manufacturing processes for finishing operations. In the last few years we have observed a rapid development in automation of manufacturing processes, especially in automatic control systems. Progress in cutting stimulates a significant increase in the metal removal rate and achieving high accuracy in terms of dimensions and shape of machine parts. New materials, which play the key role here, are used to produce cutting tools.

To meet today's high demands concerning accuracy and efficiency of the manufacturing process of machine parts, it is necessary to use computer methods for designing of technological processes.

This study aims to provide the recent advances in machining for modern manufacturing engineering, especially CNC machining, modern tools and machining of difficult-to-cut materials, optimization of machining processes, application of measurement techniques in manufacturing, modeling and computer simulation of cutting processes and physical phenomena.

Wojciech Zębala

PART 4

Machining of Difficult-To-Cut Materials

Chapter 4.1

HIGH SPEED CUTTING (HSC) AS ONE OF THE CURRENT TRENDS OF DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS MACHINING

Otko T., Zębala W., Kundrak J.

Cracow University of Technology, Poland. University of Miskolc, Hungary

Abstract: *High Speed Cutting (HSC) occupies the predominant position among observed development trends of machining. Its more and more general application in the industrial practice results from the advantages of this technology, such as: bigger cutting efficiency, better quality of the surface, lower cutting forces, more profitable thermal properties and stability of the cutting processes. The simulation model of the cutting process was presented in this chapter. The model permits the quick visualization of the process realization in the wide range of the cutting parameters. Example distributions of the cutting forces components, wedge temperature and von Mises stresses were described during the nickel alloy (Inconel 718) machining for various feeds.*

Keywords: *HSC, Difficult-to-Cut Materials, Simulation.*

HOCHGESCHWINDIGKEITZERSPANUNG (HSC) ALS EINER VON DEN GEGENWÄRTIGEN TRENDS, DER SPANABHEBENDEN FERTIGUNG VON SCHWERZERSPANENDEN MATERIALIEN

Einführung

Erste Versuche von Bearbeitung mit hoher Schnittgeschwindigkeit werden im vorherigen Jahrhundert gemacht (Salomon, Patent 1931). Es wird nachgewiesen, dass bei dem parabolischen Anstieg der Schnitttemperatur mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Temperatur bei Erreichen des Scheitelpunkts trotz Erhöhung der Geschwindigkeit wieder fällt [2,3].

Es entstand gegenwärtig ein Begriff Hochgeschwindigkeitszerspannung (HGZ), (engl. – *High Speed Cutting HSC*), die bezeichnet in der Metallverarbeitung ein Zerspanungsverfahren, z. B. beim CNC-Fräsen, bei dem die Schnittgeschwindigkeit, durch extreme hohe Werkzeugdrehzahlen sowie Vorschubgeschwindigkeiten um Vielfaches höher, die sich daraus ergebene Spandicke jedoch wesentlich geringer ist, als bei normalen Zerspanungen.

Hoher Entwicklungsgrad in der Elektromaschinenbauindustrie und die starke Wettbewerb auf dem Maschinenmarkt erfordert sowohl die Einführung von neuen Herstellungstechnologien als auch schnelle Modernisierung von

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

schon bestehenden Technologien. Die Hersteller streben nach Produzieren von hochqualitativen Produkten, die aber billig und gleichzeitig ökologisch bei der Betriebserhaltung sein sollen. Um die Forderungen des Marktes zu erfüllen, werden die Hersteller gezwungen immer höheren Leistung und Qualität bei gleichzeitiger Kostenminimalisierung zu erreichen.

Die Qualität der Maschinen und Ausrüstungen hängt im großen Teil von dem Zustand der Deckschichten der Maschinenelemente. Die gegenwärtig wichtigste und grundlegende Technologie in der Maschinenbauteilenherstellungsbereich und ist die Spannbearbeitung. Die erforderliche Mass- und Formgenauigkeit sowie Qualität der Schichtflächen werden durch Anwendung von geeigneten Zerspanungsverfahren z.B. Drehen, Fresen, Schleifen erreicht. Gleichzeitig mit der Technikentwicklung werden immer neuen Parametern untersucht, die Kostensenkung der Herstellung gewährleisten. Im diesen Sinne werden reihe von Faktoren probiert und analysiert, wie z.B. Bearbeitungsmaschinen, Art/Typ des Materials und eine Geometrie der Schneidkante von der Schnittwerkzeug und die Spannparametern. Alle diese Faktoren zusammengestellt sollen die gute Qualität der bearbeiteten Flächen und die entsprechende Bearbeitungsleistung gewährleisten [5].

Heutzutage realisierende Genauigkeiten der Spannbearbeitung liegen in 4, 5, und 6 Genauigkeitsklasse und aufweisen die Rauheit von $R_a = 0,5-2\mu\text{m}$. Der Schwerpunkt wird immer mehr von Vorbearbeitung und Abspannen zur Fertigbearbeitung verschoben, bei gleichzeitigem Streben nach hohe Oberflächengute des Werkstücks und vorher bestimmte mechanischen und tribologieschen Eigenschaften. Jede Art von Spannbearbeitung hat anderen Einfluss auf Beschaffungskosten des Werkstückes. Prozentualer Zuwachs der Kosten, der der Genauigkeitssteigerung zugeschrieben ist, hat oft einen unlinearen Charakter. Technischer Fortschritt macht es, das die Beschaffungsgenauigkeit (bei konstanten Kosten) wird immer mehr in Richtung kleineren Beschaffungstoleranzen verschoben. Heute spricht man schon über Nanotechnologie und Auszeichnet sie als eine Variante der Werkstücksbeschaffenheit mit Nanogenauigkeit bei der Präzisionsmechanik. Das Kennen vom Einfluss der einzelnen Bearbeitungsprozessfaktoren auf einzelnen Eigenschaften der Deckschicht ergibt die Polyoptimierungsmöglichkeiten von dem Bearbeitungsvorgang [1].

Gegenwärtige Spannbearbeitungsprozesse sollen eine möglichst beste Qualität der Werkstücke gewährleisten, bei guten Herstellungsleistung, Zuverlässigkeit und Ökologie. Nach der Analyse der technischen Bedingungen, Auswertung des Gebietes, Bedingungen, Mechanismen und Wettbewerbfähigkeiten der Spannbearbeitung ergibt sich, dass die erstklassige

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

Bedeutung die Qualität und Funktionseigenschaften der Erzeugnisse vor allem zählt. Daher soll es solche Entwicklung der Spannbearbeitungsmethoden folgen, die diesen Eigenschaften gerecht werden können [9]. Von Analyse der Entwicklungstendenzen der Spannbearbeitungsmethoden – Abb. 1, dominierende Position nimmt die **Bearbeitung mit hohen Spangeschwindigkeiten**. Ihre immer breitere Anwendung im Praxis, kommt von Vorteilen, die diese Technologie bringt mit sich wie: höhere Zerspanleistung, bessere Oberflächenqualität, reduzierte Spankräfte, bessere Wärmeigenschaften und Stabilität des Bearbeitungsprozesses. Dies kann, bei konsequenter Einführung von HSC, zur hohen ökonomischen Fortteilen führen [6-8].

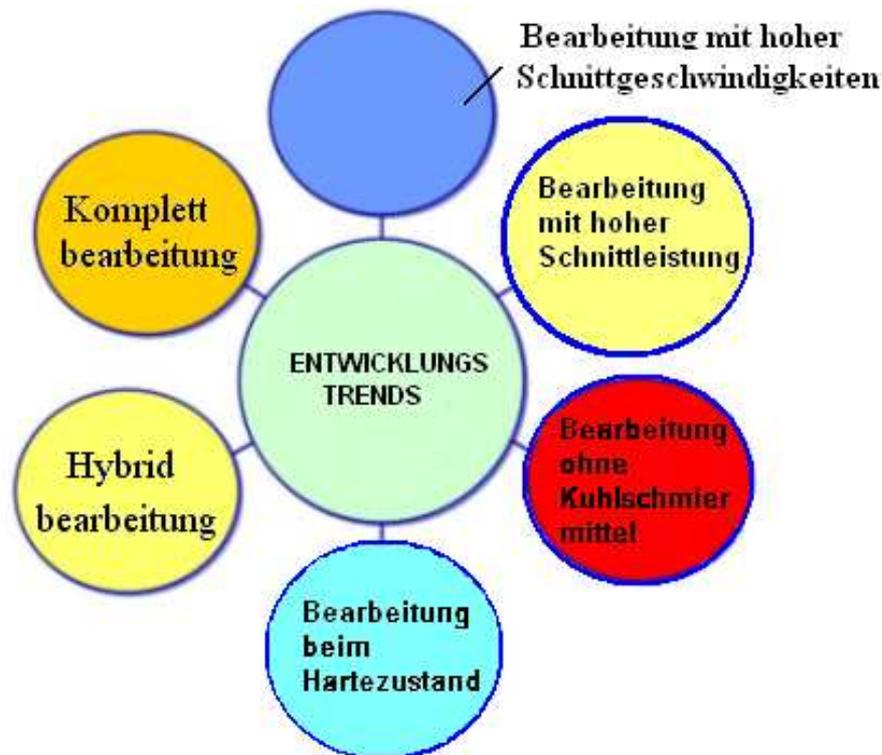


Bild. 1. Entwicklungstrends von Spannbearbeitung der Materialien

Es mangelt eine eindeutige Definition von HSC. Vorteilen von HSC sind, 5- bis 10-mal höhere Vorschubgeschwindigkeiten und bis das 30-fache geringere Schnittkräfte. Dies ermöglicht die Bearbeitung u.a. dünnwandige Werkstücke. Die Oberflächenqualität steigt, was eine Einsparung ansonsten nachgefolgter

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

Schleifoperationen bewirken kann. Ein Verzug durch Erwärmung beim Zerspanungsprozess wird auch verhindert, da die Schnittgeschwindigkeit größer ist als die Wärmeleitgeschwindigkeit. Es können gehärtete Materialien bis zu einer Härte von 62 HRC bearbeitet werden, wodurch in meisten Fällen das Härten nach Fräsbearbeitung und damit auch Gefahr des Härteverzugs entfällt.

Größere Einsparpotentiale gegenüber konventioneller Fertigung liegen sowohl im Schruppen (durch hohe Zerspanleistung) als im Schlichten (durch hohe Oberflächengüte).

Bei Nachteilen bei HSC sollte man ernennen, dass wegen extrem hohen Drehzahlen ein erheblich erhöhter Abschirmungsbedarf für den Arbeitsraum entsteht. Bereit kleinste Bruch- oder Spanstücke enormen Fluggeschwindigkeiten entwickeln können, was eine Minderung der Sicherheit bedeutet. Es ergibt sich meistens eine höhere Abnutzung des Werkzeuges. Es steigen auch die Anforderungen an die Auswuchtung der Werkzeuge, da bei der Hohen Drehzahl extreme Kräfte entstehen, die einerseits zu Werkzeugbruch führen können und andererseits die Spindellagerung stark belasten. Aufgrund der extremen Drehzahlen und Belastungen an der Arbeitsspindel ist eine teure und aufwendige Wartung und ein regelmäßiger Austausch der Arbeitsspindel wegen verhältnismäßig hohen Verschleißes notwendig. Für jede neue Werkstückgeometrie ist auch eine neue Bearbeitungsstrategie notwendig.

Werkzeuge, die für HSC geeignet sind, sind üblicherweise aus fein- und feinkörnigem Vollhärtemetall, meistens mit einem Hartstoff beschichtet und weisen eine spezielle Schneidegeometrie auf.

Die hohe Oberflächengüte wird durch Bearbeiten der Konturen mit Kugelfräsen bei kleinen Abständen der Fräserbahnen (im Bereich weniger hundertstel Millimeter) erreicht. Zum Schruppen werden dagegen vorwiegend Werkzeuge mit Eckradius eingesetzt. Häufig finden gewandelten Fräser Anwendung. Für spezielle Fertigungsaufgaben sind verschiedene Formfräser einsetzbar. Daneben finden auch als Schneidstoffe auch Polykristallines kubisches Bornitrid und PKD Anwendung.

Die Schnittgeschwindigkeit hängt sowohl vom bearbeiteten Material (Abb. 2), als auch von angesetzten Spanwerkzeuge, Werkzeugmaschine, Steuerungssysteme und Programmierung.

Dank kleinere Spanstauchung und reduzierte Querschnitt der Spanschnitt, und somit mit reduziertem Schnittwiderstand wird höhere Mass-, Formgenauigkeit und hohe Oberflächengüte erreicht, was eine Eliminierung von weitrem Schlichten erlaubt. Das bezieht sich nur auf die hohe Schnittgeschwindigkeit, die bei z.B. Bearbeitung der Alulegierungen auftreten

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

und übertrifft Werte von 8000 u/min. In solchen Bedingungen die Schnittgeschwindigkeit ist größer als die Wärmeleitgeschwindigkeit, daher bleibt der Werkstück thermisch weniger belastet, und die Wärme im Span bleibt.

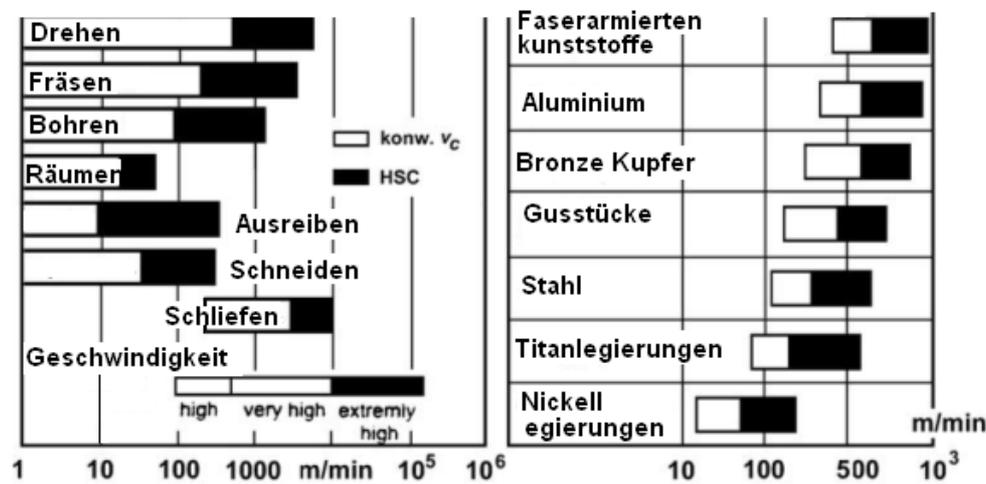


Bild. 2. Bevorzugenden Werten der Zerspanungsgeschwindigkeit [6]

Die Schnittgeschwindigkeiten bei der HSC von speziellen Materialien auf dem Eisenbasis, wie Titanlegierung, Superlegierung auf Nickelbasis, wird über die Werte, die bei konventionellen Bearbeitung eingesetzt werden, nicht übersteigen. Somit ist sie um einer Größenordnung kleiner als die bei HSC für Aluminiumlegierungen [1]. Hier genannten innovativen Technologien von Zerspanbearbeitung (Abb. 1) treten oft im Verbund für einen Weckstück z.B. gleichzeitig kann eine Trockenbearbeitung zusammen mit einer Bearbeitung im gehärteten Zustand durchgeführt werden oder Bearbeitung mit hoher Zerspanleistung als Trockenbearbeitung, eine komplette Bearbeitung kann eine HSC mit gleichzeitiger geringen Schmierung beinhalten.

Schwerzerspanenden materialien

Die hitzbeständige Legierungen auf Nickelbasis (als Superlegierungen oder Überlegierungen genant) dank ihren guten mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen werden in der Luftfahrtindustrie breit eingesetzt. Diesen Materialien werden vor allem für die Turbinenkorpussen, Verbrennungskammern, Schaufeln, Auslaufventilen usw. Leider die gleichen

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

mechanischen Eigenschaften bewirken gleichzeitig, dass die Legierungen schwer zu bearbeiten sind. Am Meisten eingesetzte Materialien in Luftfahrtindustrie werden auf dem Bild 3 dargestellt.

Die wichtigsten Eigenschaften von Superlegierungen sind: hohe Härte, hohe Standhaltung bei hohen Temperaturen, was zu hohen Schnittwiderständen bei Spanbearbeitung führt, Neigung zur Verfestigung und kleine Wärmeleitung.

Derzeit wird die Betonung auf die Oberflächenqualität von Teilen aus schwerzerspanenden Materialien gesetzt, was sich wiederum auf die Langlebigkeit, Ermüdungsfestigkeit, Leistungsfähigkeit und Funktionalität eines Werkstückes überlagert.

Eine Literaturanalyse, die Erscheinungen bei dem Zerspanungsprozess beschreibt, deutet darauf hin, dass mit der Schnittgeschwindigkeitssteigerung – bei konstanter Volumenleistung – die Schnittkräfte sinken. Dies erlaubt die Bearbeitung von dünnwandigen Werkstücken.

Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Schnittkräfte wird mit dem Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit des Zerspannschichtes auf die Plastizität des Werkstückmaterials und mit den Spanansatzerscheinungen verbunden. Auch die Temperatur in der Bearbeitungszone ist direkt mit der Schnittgeschwindigkeit verbunden und überwiegend steigt zusammen mit der Schnittgeschwindigkeitssteigerung [1] [6].

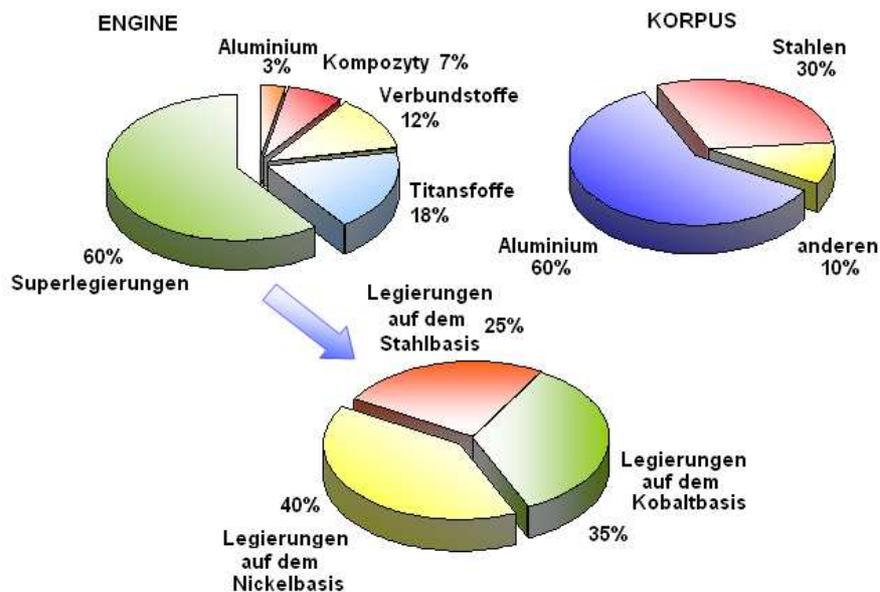


Bild. 3. Materialien, die am meistens in der Luftfahrtindustrie eingesetzt werden – Angaben nach der Firma ISCAR

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

Die Verbindung senkenden Schnittkräften mit der kleinen Wärmekumulation in dem Werkstück gibt die reduzierte Werkzeugabnutzung. Ein Übergang zu der HSC bringt mit sich, dass die Deformation vom Span und seine Verformung (Zerquetschen) bleiben minimal. Dies führt dazu, dass eine geringe Wärmeüberweisung an den Werkstück folgt, und keine bedeutsame Härten an Werkstückoberfläche statt findet [4].

Während Bearbeitung mit kleineren Schnittgeschwindigkeiten überwiegend Abnutzungseffekt des Werkzeuges auf der Auflagefläche ist die Schleifabnutzung. Mit der Schnittgeschwindigkeitssteigerung kommt zur immer mehr Adhäsionsabnutzung, wobei bei höheren Schnittgeschwindigkeiten dominiert die Diffusionsabnutzung. Daher kommt zur Temperatursenkungen bei höheren Schnittgeschwindigkeiten, weiter zur kleineren Abnutzung des Werkzeuges auf der Auflagefläche, und somit auch kleinere Wärme wird dem Werkstück zugeleitet.

Um den gegenwärtigen hohen Genauigkeits- und Leistungserforderungen von Maschinenteilen aus schwerzerspanenden Materialien gerecht zu werden ist es notwendig für das Entwerfen von den Technologischenprozessen die Computersimulationsmethoden einzusetzen. Die Anwendung der Simulationsmethoden vom Zerspanen lässt eine schnelle Visualisierung des Prozesses in breiten Bereichszerspanparametern zu.

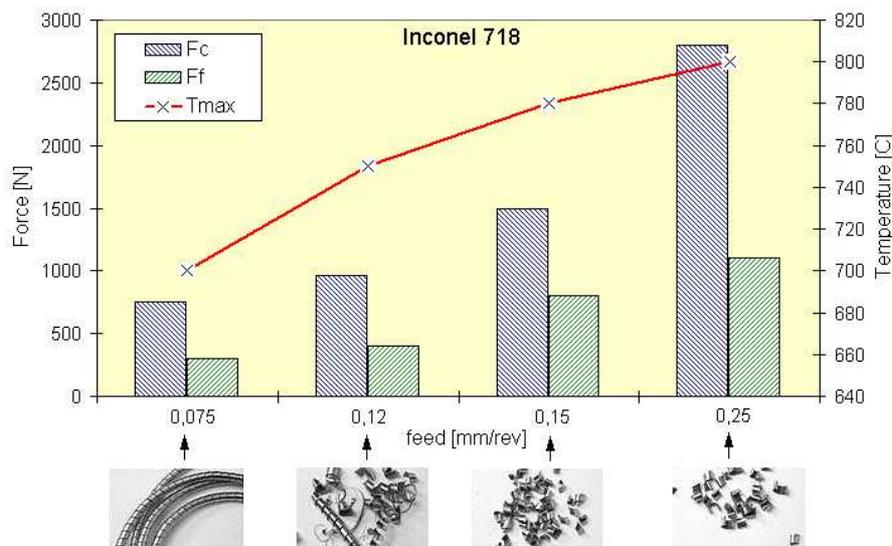


Abb. 4. Maximum von Hauptkraft F_c und Vorschubkraft F_f bei dem Zerspanen vom **Inconel 718**. Zerspanenparametern: $f = 0,075 \div 0,25$ mm/rev, $a_p = 2$ mm. Die rote Kurve gibt die Maximum von Temperatur ab T_{max} in der Nähe von der Schneidkante

DEVELOPMENT IN MACHINING TECHNOLOGY

Auf Abbildung 4 wurden beispielhaften Komponentenverteilungen der Gesamtzerspankraft, Schneidkantetemperatur (Abb. 5) und den reduzierten Spannungen nach der Huber-Mises Hypothese (Abb. 6) während Bearbeitung von Nickellegierung Inconel 718 für verschieden Vorschube dargestellt [10].

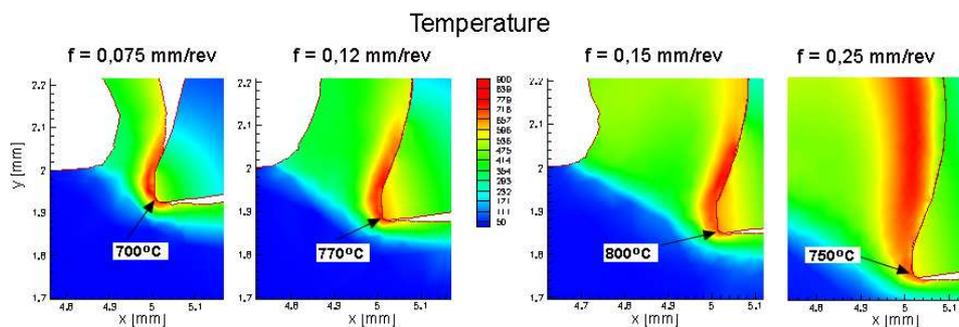


Abb. 5. Temperaturverteilung bei dem Vorschub : $f = 0,075 \div 0,25$ mm/rev.

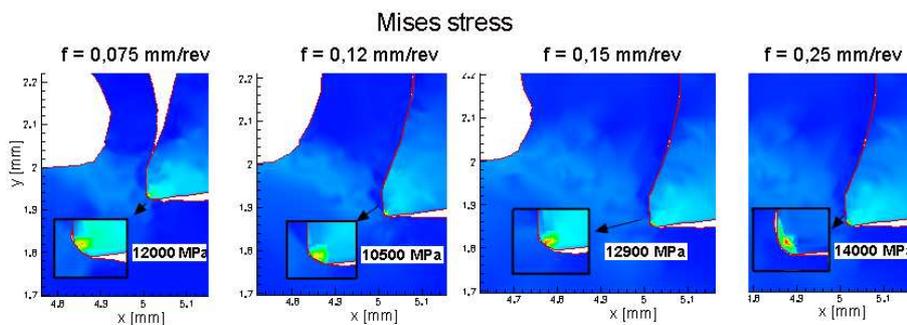


Abb. 6. Spannungsverteilung bei dem Vorschub: $f = 0,075 \div 0,25$ mm/rev.

Auf dem Abbildung 7 wurden Komponentenverteilungen von Spannungen in Richtung X-Achse im Spanzzone für verschiedene Vorschube. Merkt man bedeutsame Zunahme von maximalen Spanwerten bei sinkenden Vorschubswerten (z.B. für $f=0,25$ mm/rev - $\sigma_x=3\ 000$ MPa und für $f=0,075$ mm/rev - $\sigma_x=15\ 000$ MPa).

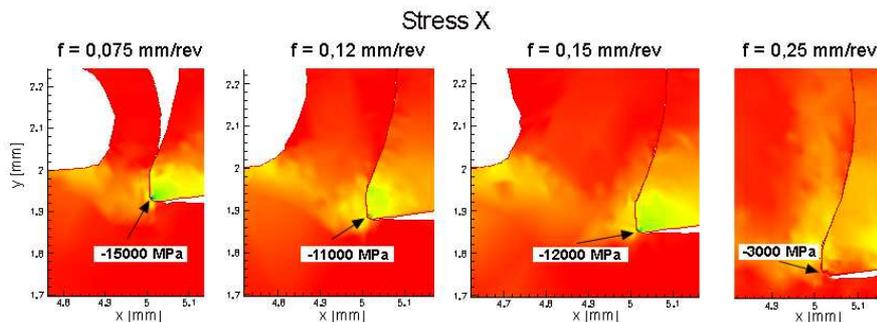


Abb. 7. Verteilung von Kraft X bei dem Vorschub: $f = 0,075 \div 0,25$ mm/rev.

Zusammenfassung

Die hitzbeständige Legierungen auf Nickelbasis (als Superlegierungen oder Überlegierungen genant) dank ihren guten mechanischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen werden in der Luftfahrtindustrie breit eingesetzt. Diesen Eigenschaften bewirken, dass die Legierungen schwer zur Bearbeiten sind. Bei Beurteilung der Bearbeitungsergebnissen wird eine Betonung auf Oberflächequalität gesetzt, da diese Parameter oft entscheidend ist für Langlebigkeit, Ermüdungsfähigkeit Leistungsfähigkeit und Funktionalität des Werkstückes.

Bearbeitung mit hohen Spanngeschwindigkeiten bringt Vorteile, wie höhere Zerspanleistung, gute Oberflächequalität, reduzierte Spankräfte, gute Stabilität des Bearbeitungsprozesses und eignet sich gut zum Erfüllen von oben genannten Forderungen.

Im Artikel wurde aufgewiesen, dass die überwiegende Abnutzung des Werkzeuges auf die Auflagefläche als Schleifabnutzung erfolgt. Mit der Schnittgeschwindigkeitssteigerung kommt zur immer mehr Adhäsionsabnutzung, wobei bei höheren Schnittgeschwindigkeiten die Diffusionsabnutzung dominiert. Bei höheren Schnittgeschwindigkeit kommt zur Schnitttemperatursenkungen, was kleinerer Abnutzung des Werkzeuges auf der Auflagenfläche resultiert und gleichzeitig weniger Wärme wurde zu dem Werkstück zugeleitet. Es ist empfehlenswert bei Anwendung bei Bearbeitungstechnologie von schwärzespanender Materialien eine Computersimulationsmethoden einzusetzen. Die Anwendung der Simulationsmethoden vom Zerspanen lässt eine schnelle Visualisierung des Prozesses in breiten Bereich von Zerspanparametern zu.

Literatur

- [1] ASPINWALL D. i in.: (1999) *HSM takes of in the aerospace sector.*, Metalwork.Express, 4-5, 8-9.
- [2] DARLEWSKI J., GAWLIK J., GRZESIK W., JEMIELNIAK K., KAWALEC M., RUSZAJ A., WEISS E., ŻEBROWSKI H.: (1997) *Trendy w ubytkowych metodach obróbki.*, Prace Naukowe Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej.
- [3] DARWISH S.M.: (2000) *Machining of difficult-to-cut materials with bonded tools.*, International Journal of Adhesion & Adhesives. 20: 279-289.
- [4] EZUGWU E.O., BONNEY J.: YAMANE Y. (2003) *An overview of the machinability of aeroengine alloys.*, Materials Processing Technology, 134: 233-253.
- [5] GRUDOWSKI P., PRZYBYLSKI W., SIEMIĄTKOWSKI M. (2006) *Inżynieria jakości w technologii maszyn*, WPG.
- [6] OCZOŚ K.: (1998) *Postęp w obróbce skrawaniem. I. Obróbka z dużymi prędkościami (High Speed Machining)*, Mechanik. 3:110.
- [7] OCZOŚ K.: (1998) *Postęp w obróbce skrawaniem. II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem.*, Mechanik. 5-6:307.
- [8] OCZOŚ K.: (1998) *Postęp w obróbce skrawaniem. III. Obróbka materiałów twardych i utwardzonych.*, Mechanik. 7:419.
- [9] OCZOŚ K.: (2002) *Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. I. Obróbka skrawaniem.*, Mechanik. 8-9:537.
- [10] ZĘBALA W., SŁODKI B.: (2006) *Efficiency Improvement of Inconel Cutting.*, ITC, Zlin, Czechy. 60:1-7.