

Entwicklung von Werkzeugschäften für einen Betrieb im überkritischen Drehzahlbereich

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.,

vorgelegt

von M. Sc. Rafiq Huseynov

geboren am 01.05.1986 in Sumqayit, Aserbaidshan

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bertram Hentschel

Prof. Dr.-Ing. Alfons Ams

Tag der Verleihung: 6. August 2015

Freiberger Forschungsberichte für
Konstruktions- und Fertigungstechnik

Rafiq Huseynov

**Entwicklung von Werkzeugschäften für einen
Betrieb im überkritischen Drehzahlbereich**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Freiberg, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4009-8

ISSN 2365-9785

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*Gewidmet meinen lieben Eltern,
die das Fundament meiner Ausbildung gelegt haben.*

*„Meine liebe Frau Shahzada und unsere süße Tochter Sara waren die
unversiegbare Quelle der Kraft für die Realisierung dieser Arbeit.“*

Vorwort des Herausgebers

Das Hochgeschwindigkeitsfräsen ist seit über 20 Jahren in die Fertigung eingezogen und hat eine weite Verbreitung gefunden. Besonders angewendet wird es im Werkzeug- und Formenbau und der Aluminiumbearbeitung. In der Folge wurden vermehrt Motorspindeln mit hohen Drehzahlen in höheren Leistungs- und Momentenbereichen entwickelt und die Maschinen mit entsprechenden schnellen Vorschubantrieben ausgestattet. Die Entwicklung der Schneidstoffe bot die entsprechende Grundlage seitens des Spanungsvermögens.

Durch das Bedürfnis entsprechend funktional konstruierte Bauteile mit ausgeprägten Kavitäten und z. T. kleindimensionalen Formelementen (z. B. Radien) fertigen zu müssen, ergibt sich die Notwendigkeit schlanke und auch lange Werkzeuge einzusetzen. Zur Realisierung des HSC-FräSENS und der damit verbundenen Produktivität benötigen diese Werkzeuge aber hohe Drehzahlen. Diese Drehzahlen begrenzend steht aber die fallende erste Biegeeigenfrequenz der Drehzahlerhöhung entgegen. Üblicherweise werden HSC-Werkzeuge bis zu 60/70 % der Resonanzdrehzahl eingesetzt. Dann begrenzen Schwingungswirkungen (Verschleiß, schlechte Oberflächengüte) und die wachsende Schwingungsamplitude des Werkzeuges die sichere Bearbeitung.

Die Werkzeugindustrie versucht durch entsprechend angepasste Konstruktionen eine hohe Eigenfrequenz zu realisieren. Das löst natürlich Einzelfälle lässt aber einen bereits heute nutzbaren Drehzahlbereich für schlanke Werkzeuge nicht nutzen. Diese Fälle werden in der betrieblichen Praxis vermieden und durch weniger produktive Verfahren ersetzt oder es findet eine entsprechende Konstruktionsänderung statt.

Es ist gesicherte Erkenntnis, dass die Schwingungen durch die gegebene Unwucht des Werkzeugsystems, die mit dem Quadrat der Drehfrequenz steigt, verursacht werden. Andererseits ist aus dem Turbinenbau bekannt, dass überkritisch rotierende Systeme ruhig laufen, wenn man diese unbeschadet durch die Resonanzstelle fahren kann. Genau diesem Problemkreis widmet sich die Arbeit.

Die grundsätzlichen Fragestellungen die in der Arbeit untersucht und vollständig beantwortet werden sind:

1. Was sind die mechanischen Gesetzmäßigkeiten, die ein Spindelwerkzeug im überkritischen Drehzahlbereich beruhigt drehen lassen und
2. wie kann man bruchssicher einen schlanken Schaft durch die Resonanzdrehzahl beim Hochlaufen und Bremsen bekommen.

Die Antwort auf die erste Fragestellung ist der im überkritischen Drehzahlbereich immer wirkende Selbstzentrierungseffekt und ein durch die Konstruktion des Schaftes realisierbarer Selbstwuchteffekt. Praktisch nutzbar ist dieses ab einer Drehzahl, die 40/50 % über der Resonanzdrehzahl liegt. Die Antwort auf die zweite Fragestellung ist, dass die aufgenommene Schwingungsenergie des Werkzeuges durch Unwuchterregung entsprechend klein zu halten ist. Die heutigen Motorspindeln weisen ein genügend großes Drehbeschleunigungsvermögen auf um schnell (3-5 Sekunden) in den überkritischen Drehzahlbereich zu gelangen. Das Werkzeugsystem soll dazu noch eine geringe Unwucht und eine genügende Rundlaufgenauigkeit aufweisen. Das weisen HSC-Werkzeuge und Aufnahmen standardmäßig auf.

Die Aufgabenstellung für Herrn Huseynov ging von der Nutzung des Selbstwuchteffektes im überkritischen Drehzahlbereich und der Realisierung einer entsprechenden Dämpfungswirkung im Werkzeug beim Hochlaufen und Bremsen aus.

Herr Huseynov hat die Problemlösung mit hoher Zielstrebigkeit, bemerkenswertem Fleiß und wachsendem Verständnis für die Theorie und der prototypischen Umsetzung vorangetrieben. Neben der Einreichung der Promotion konnte ein internationales Patent angemeldet werden. Zu hoffen bleibt, dass diese Lösung von der Industrie aufgegriffen wird um entsprechende produktivitätswirksame Innovationen auszulösen.

Prof. Dr.-Ing. habil. Bertram Hentschel

Freiberg, im September 2015

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bertram Hentschel, meinem Doktorvater und Leiter des Lehrstuhls für Konstruktions- und Fertigungstechnik, danke ich sehr herzlich für die Ermöglichung dieser Dissertation, für seine fachliche Betreuung, seine Anregungen und stete Gesprächsbereitschaft sowie für die mir gewährte wissenschaftliche Freiheit und die Entfaltungsmöglichkeiten am Lehrstuhl.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfons Ams, Dekan der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, danke ich für die Übernahme des Korreferats sehr herzlich.

Weiterhin bin ich dem Leiter des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Kröger für sein Interesse an meiner Arbeit und insbesondere für die tatkräftige Unterstützung bei der Erlangung eines Promotionsstipendiums sehr dankbar.

Herzlicher Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Thomas Geipel für die wohlwollende Begleitung und Unterstützung während meines Promotionsstudiums, das große Interesse an meiner Arbeit, die Diskussionsbereitschaft und die entstandene Freundschaft. Des Weiteren danke ich allen Kollegen am Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung für die liebevolle Aufnahme und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonders dankbar bin ich Herrn Dr.-Ing. Bernhard Hartmann für das umfassende Korrekturlesen meiner Arbeit.

Ebenfalls gilt mein besonderes Dankeschön dem Werkstattmitarbeiter Herrn Udo Hermann, der schnell und unkompliziert auch ausgefallene Ideen beim Bau von Versuchsmustern und des Prüfstandes umgesetzt hat. An der Stelle danke ich auch Herrn Dipl.-Ing. Kurt Fredersdorf für die Hilfe bei der Durchführung von experimentellen Modalanalysen und Herrn Torsten Hegewald für die Unterstützung bei der Erstellung des Messprogramms zur Auswertung von erfassten Messdaten.

Der Begabtenförderung der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit (FNF) verdanke ich das Promotionsstipendium, das die finanzielle Grundlage meiner Forschungsarbeit darstellte. Außerdem möchte ich mich beim Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die Förderung der zehnmonatigen Forschungsarbeiten zu Beginn meines Aufenthaltes in Deutschland bedanken

Aus dem Kreis meiner Landsleute in Deutschland danke ich besonders herzlich Herrn Dr.-Ing. Rezo Aliyev für die zahlreichen lösungsorientierten und fruchtbaren, fachlichen Diskussionen und die entspannenden sowie sehr angenehmen Stunden im Kreise seiner Familie. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Seymour Ibrahimov, Herrn Teymur Ibrahimov und Herrn Ilgar Abbasov für ihre tatkräftige Unterstützung während meines Aufenthaltes in Freiberg.

An der Technischen Universität Aserbaidshan in Baku wurde ich als Diplom-Ingenieur ausgebildet. Deshalb möchte ich mich auch bei allen meinen früheren Lehrern der TU Aserbaidshan bedanken. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Vagif Movlasade, Leiter des Lehrstuhls für Maschinenbautechnologie, und Herrn Dr.-Ing. Arastun Mammadov, Dekan der Fakultät Maschinenbau, für deren unersetzlichen Beitrag für meine berufliche Entwicklung.

Ausdrücklich am Herzen liegt mir ein besonderer Dank an Frau Jamila Tosoyeva für ihre hilfreiche Unterstützung bei meinem Besuch des Deutschkurses in Baku.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, Frau Firangiz Huseynova und Herrn Dipl.-Ing. Sarkhan Huseynov, die mir in allen Lebenslagen hilfreich zur Seite standen. Sie legten mit Ihrer Liebe und Beharrlichkeit das Fundament meiner Ausbildung und damit auch dieser Arbeit. Meine Freude über den Erfolg dieser Arbeit teile ich ebenfalls mit meinem Bruder Tofig Huseynov, meiner Schwester Rana Huseynova und ihrem Mann Samir Gulamov. Alle Drei unterstützten meinen wissenschaftlichen Werdegang indem sie mir stets ein offenes Ohr geschenkt und fruchtbare Diskussionen mit mir geführt haben.

Als letztes aber wahrlich nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner lieben Frau Shahzada Huseynova, die in jeglicher Hinsicht hinter mir stand und steht, mich motiviert und bestärkt hat, diese Forschung zum Abschluss zu bringen. Die vorliegende Ar-

beit wäre ohne ihre liebevolle Unterstützung nie zustande gekommen. Vor allem danke ich ihr für die fortwährende Geduld und die vielen aufmunternden Worte in den schwierigsten Zeiten meines Studiums. Ihr, meiner lieben Frau, gilt daher mein größter Dank. Meiner Tochter Sara, die täglich Glück und Freude in mein Leben bringt, danke ich auf ganz besondere Weise.

Rafiq Huseynov

Freiberg, im September 2015

Kurzfassung

Hochgeschwindigkeitsfräsen (HSC-Fräsen) ist insbesondere im Werkzeug- und Formenbau das am häufigsten eingesetzte Fertigungsverfahren zur Zerspaltung von Werkstücken mit tiefen Kavitäten. HSC-Fräsen stößt insbesondere dann an Grenzen, wenn Werkzeuge mit besonders großem Schlankheitsgrad ($L/D > 20$) eingesetzt werden müssen. Die großen Aspektverhältnisse bewirken eine Abnahme der ersten biegekritischen Eigenfrequenz. Zusätzlich nimmt die durch die Unwucht erzeugte Fliehkraft quadratisch mit der Spindeldrehzahl zu. Die angeregten nahezu nicht gedämpften Schwingungen zwingen zum Arbeiten im unterkritischen Drehzahlbereich. Das bedeutet, dass die maximale Einsatzdrehzahl der Schaftwerkzeuge durch ihre erste biegekritische Eigenfrequenz begrenzt ist. Neben den Schwingungen sind Werkzeugbrüche ebenso nicht auszuschließen. Diese Effekte führen dazu, dass überlange Schaftwerkzeuge konventionell nicht mit HSC-tauglichen Drehzahlen eingesetzt werden können. Dadurch bleiben die Vorteile der HSC-Bearbeitung und das verfügbare Leistungspotenzial moderner HSC-Spindeln (z.B. Spindeldrehzahlen bis 80.000 min^{-1}) ungenutzt.

Im Rahmen der Dissertation wurde eine Methode zur sicheren Gestaltung von überlangen HSC-Werkzeugschäften ($L/D > 20$) entwickelt und erprobt. Dadurch sind die bezeichneten Nachteile zu umgehen. Die durch das entwickelte Lösungsverfahren konstruierten überlangen HSC-Schaftwerkzeuge sind in der Lage, die erste Biegeeigenfrequenz zu durchfahren um danach mit überkritischen Drehzahlen zu arbeiten. Die Grenzdrehzahlen marktüblicher überlanger Schaftwerkzeuge werden dabei deutlich (8 – 10 fach) überschritten. Die durchgeführte wissenschaftliche Arbeit eröffnet auch weitere Möglichkeiten der Anwendung von einseitig eingespannten mit überkritischen Drehzahlen zu betreibenden Schäften oder Wellen.

Schlagwörter: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Schaftwerkzeuge, Selbstwuchten, kritische Drehzahl, Resonanzschwingungen, Schwingungsdämpfung, Selbstzentrierung.

Abstract

Title of Dissertation: Development of tool shanks for operation in the supercritical speed range

High-speed milling (HSC milling) is the most used manufacturing technology for machining work pieces with deep cavities especially in die and mold-making. HSC milling encounters particular limitations wherein tools must be used with peculiar large slenderness ratio ($L/D > 20$). The large aspect ratios cause reduction in the first natural critical bending frequency. In addition, the centrifugal force generated by the unbalance increase proportionally to the square of the spindle rotational speed. And here the excited not damped resonance vibrations force to work at rotational speeds in the subcritical range. This means, that the maximum allowed operating rotational speed of shank tools is limited by their first natural critical bending frequency. Beside vibrations tool breakages are also not inevitable. These effects lead to that the over length shank tools conventionally cannot be used with HSC-capable rotational speeds. Thereby, the advantages of HSC machining and the available potential capacity of modern HSC spindles (e.g. spindle rotation speeds up to 80.000 min^{-1}) stay unused.

As part of the dissertation a method for the safe design of over length HSC-tool shanks ($L/D > 20$) were developed and tested. Thereby the aforementioned issues are feasible to handle. The constructed by the developed solution procedures over length HSC-shank tools are able to pass through the first bending natural frequency thereafter to work in supercritical speeds. The speed limits of the usual market over length shank tools are thereby significantly (8-10 times) can be exceeded. The accomplished scientific work also opens up further possibilities for application of one-sided clamped spindles and shafts in supercritical speeds.

Keywords: High speed machining, shank tools, self-balancing, critical rotational speed, resonant vibrations, vibration damping, self-centering

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XV
Formel- und Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Hochgeschwindigkeitzerspannung – HSC-Fräsen.....	3
2.2 Grenzen des HSC-FräSENS.....	5
2.3 Analyse marktüblicher lang auskragender Werkzeugsysteme	6
2.3.1 HSC-Schaftfräser.....	6
2.3.2 Spannfutter-Werkzeug-System.....	9
2.3.3 Zusammenfassung der Analyse	13
3 Problemstellung	14
4 Zielsetzung und Aufgabestellung	18
5 Stand des Wissens zur Dynamik von Rotorsystemen	20
5.1 Schwingungen von dynamischen Systemen.....	20
5.2 Physikalische Grundlagen der Unwuchterzeugung.....	21
5.3 Dynamik von HSC-Spannfutter-Werkzeug-Systemen.....	22
5.4 Dynamisches Biegeverhalten von elastischen Rotoren.....	26
5.5 Automatisches Wuchten.....	31
5.5.1 Automatischen Wuchtmethoden.....	31
5.5.2 Selbstwuchteinrichtungen.....	35
5.5.3 Analyse der Vorrichtungen zum Auswuchten von Hohlkörpern mit fließfähigen Stoffen	38

6	Entwicklung des dynamischen Ersatzmodells für auskragende Hohlwelle	43
6.1	Auslegung der Konstruktion für HSC-Werkzeugschäfte	43
6.2	Werkstoffauswahl für die hohl ausgeführte Werkzeugschäfte.....	45
6.3	Allgemeines Dynamikmodell.....	47
6.4	Selbstzentrierungseffekt	66
7	Entwicklung einer Konzeption zum Selbstwuchten von HSC-Werkzeugschäften.....	71
7.1	Anforderungen an das Selbstwuchten	71
7.2	Theorie des Selbstwuchtens mit Flüssigkeiten.....	72
7.3	Steigerung der Effektivität des Selbstwuchtens	82
7.4	Entwicklung des selbststabilisierenden Werkzeugschaftes für den Betrieb im überkritischen Drehzahlbereich.....	85
7.4.1	Festlegung des Ausgleichstoffes	85
7.4.2	Einfluss der statischen Schaftauslenkung auf den Wuchtvorgang.....	89
7.4.3	Bestimmung der Masse des Ausgleichstoffes.....	91
8	Versuchsaufbau und -durchführung.....	94
8.1	Versuchsziel und -aufgaben	94
8.2	Versuchsplanung und -logik.....	95
8.3	Versuchsstandbeschreibung	96
8.3.1	Versuchsmaschine	96
8.3.2	Versuchsobjekt	97
8.3.3	Auslegung eines Resonanzdurchfahrtlagers für Schäfte	98
8.3.4	Eingesetzte Schwingungsmesstechnik.....	101
8.3.5	Messsoftware zur Schwingungsanalyse	102

8.3.6	Aufbau des Versuchsstandes	104
8.4	Experimentelle Modalanalyse	105
8.5	Vergleichsversuche bei Resonanzdurchfahrt.....	107
8.5.1	Schwingungsmessung beim Selbstzentrierungseffekt.....	107
8.5.2	Vorversuche zum Selbstwuchten.....	110
8.5.3	Bewertung von Vergleichsversuchen	113
8.6	Versuche zum Selbstwuchten.....	114
8.6.1	Einfluss des Radialschlags.....	114
8.6.2	Einfluss der Masse des Ausgleichstoffes.....	117
8.6.3	Einfluss der statischen Nachgiebigkeit des Schaftes	120
8.6.4	Einfluss der Höhe der Wuchtkammer.....	122
8.6.5	Versuche mit der waagrecht stehenden Spindel	124
8.7	Diskussion und Bewertung der Versuchsergebnisse	126
8.7.1	Methode zur Auslegung der überlangen HSC- Werkzeugschäfte.....	126
8.7.2	Nutzungsbeispiel zur praktischen Umsetzung.....	128
8.7.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	130
9	Zusammenfassung.....	132
	Literaturverzeichnis.....	134
	Anhang	151