

Thomas Emmer, Florian Welzel, Dmytro Borysenko,
Vadym Voropai, Magdeburg, Deutschland,
Dac Trung Nguyen, Hanoi, Vietnam

ENTWICKLUNG EINES MATHEMATISCHEN MODELLS DES GLÄTTENS UNTER EINSATZ VON FEA

Abstract: *Der folgende Artikel umfasst Informationen aus der Forschung, in Rahmen von der ein mathematisches Modell des Glättens entwickelt wurde. Glätten ist eine effiziente Fertigungstechnik für Finishbearbeitung der Oberflächen metallischer Bauteile. Mit Einsatz des Glättens ist es möglich eine sehr hohe Oberflächengüte zu erreichen, Oberflächeneigenschaften zu verbessern und Qualität eines Produktes zu erhöhen. Das mathematische Modell des Prozesses wurde unter Einsatz von FEA entwickelt, dafür wurde eine spezialisierte Software „AdvantEdge“ von der Firma Third Wave Systems eingesetzt. Mithilfe der FEM-Simulationen kann die Anzahl von realen Experimenten während der Modelentwicklung reduziert werden und können Prozesseigenschaften ermittelt werden, die sich im realen Experiment schwer oder gar nicht definieren lassen. Das entwickelte mathematische Modell des Glättens erleichtert Prozessoptimierung, ermöglicht die Verminderung der Anzahl von praktischen Experimenten und führt zur Erhöhung der Kosteneffizienz und der Umweltverträglichkeit. Diamantglätten; FEM; Vier-Faktoren-Experiment; mathematisches Prozessmodell; quadratische Regressionsgleichung; Spannungen.*

Keywords: *Diamantglätten; FEM; Vier-Faktoren-Experiment; mathematisches Prozessmodell; quadratische Regressionsgleichung; Spannungen.*

1. Einleitung

Die moderne Produktion ist ein System, das sich kontinuierlich und sehr schnell entwickelt. Unter solchen Umständen ist es sehr wichtig, den Zeitaufwand für Produktionsvorbereitung zu minimieren, um die Wettbewerbsfähigkeit und das Einkommen des Unternehmens zu erhöhen. Die mathematische Modellierung der Bearbeitungsprozesse unter dem Einsatz von FEA ermöglicht eine schnellere Produktionsvorbereitung und Bearbeitungsoptimierung der neuen Produkte.

Techniken der Finishbearbeitung haben einen bestimmenden Einfluss auf die Oberflächengüte und auf die Qualität der Bauteile. Sie bestimmen die Verschleißbeständigkeit und die Dauerfestigkeit der Bauteile. Glätten ist ein spanloser Bearbeitungsprozess, in dem die Oberfläche eines metallischen Bauteils durch das Werkzeug plastisch deformiert wird. Dabei entsteht eine harte Oberflächenschicht mit der hohen Oberflächengüte. Aufgrund der hochgradigen plastischen Deformation entstehen die Druckeigenspannungen in der Oberflächenschicht. Das alles zusammen verbessert die Oberflächeneigenschaften und führt zur Qualitätserhöhung der Bauteile.

Modellierung des Glättens mit FEA kann sowohl bei der Erforschung als auch bei der Prozessoptimierung helfen.

2. Stand der Technik und Motivation für Prozessmodellierung

Diamantglätten ist eine Fertigungsmethode, wobei die Oberflächenschicht des zu bearbeitenden Bauteils durch das Werkzeug plastisch deformiert wird. Dafür verwendet man Werkzeuge mit dem Diamanteinsatz. Die Diamantoberfläche des Werkzeugs ist während des Prozesses an die Bauteiloberfläche angepresst und gleitet an ihr. Dabei entstehen die plastischen Deformationen in der Oberflächenschicht des Bauteils und das führt zu solchen Vorteilen:

- Verminderung der Oberflächenrauheit
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Entstehung der Druckeigenspannungen
- Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit
- Kornverfeinerung

Im Vergleich zu verschiedenen Arten der spanenden Bearbeitung hat die geglättete Oberfläche eine sehr glatte Struktur. Z.B. hat eine geschliffene Oberfläche Kratzen von den Werkzeugkörnern, was ihre Eigenschaften verschlechtert. Durch Diamantglätten ist es möglich die Oberflächenrauheit um 90% zu vermindern [1-5]. Die plastischen Deformationen im Prozess führen zur Erhöhung der Oberflächenhärte wegen der Kaltverfestigung [6]. Entstehung der Druckeigenspannungen spielt eine große Rolle für die Qualität der Oberflächenschicht und ist ein sehr wichtiges Produkt des Glättens [7]. Das alles führt zu Erhöhung der Funktionalität der Oberfläche, eine höhere Verschleißbeständigkeit und Dauerfestigkeit der Bauteile [8].

Während des Glättens passieren komplizierte Deformationsprozesse in der Oberflächenschicht des Bauteils. Für eine bessere Einsicht in den Prozess können die Modellierungstechniken eingesetzt werden. Das mathematische Modell des Glättens erleichtert und macht effizienter die Optimierung des Prozesses und kann dabei helfen, die vorgeschriebene Qualität zu gewährleisten.

Im Bereich der analytischen Modellierung des Glattwalzens wurden schon manche Forschungen durchgeführt. Einige Modelle basieren auf den theoretischen Kenntnissen über die physischen Prozesse, die beim Glattwalzen passieren – das sind die theoretischen analytischen Modelle. In Rahmen der Forschung von M. Korzynski [9] wurde ein solches Modell für Optimierung der Anpresskraft entwickelt. Dabei wurde die Wirkung verschiedener Prozessparameter (Vorschub, Werkzeugradius, mechanische Werkstoffeigenschaften usw.) auf Werkstoffverschiebung im Bearbeitungsprozess erforscht. Mithilfe des entwickelten Modells ist es möglich

die optimale Anpresskraft für den bestimmten Prozess zu definieren. In der Forschung von F. Lei Li [10] wurde ein anderes theoretisches analytisches Modell entwickelt. Mit diesem Modell kann man die Oberflächenrauheit auf Basis von der Anpresskraft vorhersagen. Für die Modellverifizierung wurde ein praktisches Experiment mit zwei Al-Legierungen gemacht. In den Arbeiten von L. Hiegemann u.a. [11-13] hat man auch die Entstehung der Rauheit bei den beschichteten Oberflächen erforscht. Auf Basis der Theorie von Kontaktdruck wurde ein analytisches Modell für Vorhersage der Oberflächenrauheit nach dem Glattwalzen entwickelt und verifiziert.

Es wurden auch die experimentbasierten Modelle des Glattwalzens mit dem kugel- und rollenförmigen Werkzeug entwickelt. In der Forschung von A. Sagbas [14] wurde ein quadratisches Regressionsmodell des Glattwalzens erstellt. Mithilfe dieses Modells ist es möglich arithmetischen Mittenrauwert R_a nach der Bearbeitung bei verschiedenen Prozessparametern vorherzusagen. Das Modell basiert auf einem Vier-Faktor-Experiment und dafür wurden 30 reale Experimente mit den unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt. Aber das Modell wurde nur für eine bestimmte Al-Legierung entwickelt und ist nur für diese Legierung einsetzbar. Ein empirisches analytisches Modell des Glattwalzens wurde auch in der Arbeit von M.M El-Khabeery und M.H El-Axir [15] erstellt. Für Entwicklung des Modells wurde ein Drei-Faktoren-Experiment eingesetzt und 20 reale Experimente für Al-Legierung 6061-T6 durchgeführt. Die Eingangparameter des Modells sind Schnittgeschwindigkeit, Anzahl der Durchgänge und Einpresstiefe. Mit diesem Modell ist es möglich arithmetischen Mittenrauwert R_a , Mikrohärtigkeit HV und Eigenspannungen σ_{max} nur für Al-Legierung 6061-T6 vorherzusagen.

Meistens ist die Entwicklung solcher Modelle sehr aufwendig und braucht mehrere experimentelle Untersuchungen und jeder weitere Werkstoff vermehrt die Anzahl der Experimente. Manchmal sind auch die interessierenden Prozesseigenschaften schwer zu definieren. Deshalb kann die Entwicklung solcher analytischen Modelle durch den Einsatz von FEA effizienter werden. Dabei kann die Anzahl der kostenintensiven praktischen Experimente reduziert werden. Das führt zur Erhöhung der Kosteneffizienz und der Umweltverträglichkeit. Mit Einsatz von FEA ist es auch möglich die Prozesseigenschaften zu definieren, die sich durch praktische Experimente schwer oder gar nicht ermitteln lassen. Das sind z.B. Temperaturen, Spannungen und plastische Deformationen im Kontaktbereich. Sie sind sehr wichtig für den Prozess und können mit FEA definiert werden.

3. Mathematische Modellierung des Glättens unter Einsatz von FEA

Die wichtigste betriebsorientierte Aufgabe eines analytischen Modells des Prozesses ist die Bearbeitungsoptimierung. Für Optimierung des Prozesses muss ein deutliches Ziel quantitativ formuliert werden. Ein solches quantitatives Ziel ist ein Optimierungsparameter. Der Optimierungsparameter ist ein Ergebnis des zu erforschenden Prozesses. Durch die Umstellung der Prozessparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschub usw.) kann der Optimierungsparameter verschiedene Werte bekommen. So ist es möglich den Bearbeitungsprozess nach dem gewählten Optimierungsparameter optimieren. Der gewählte Optimierungsparameter muss eindeutig sein, das heißt, dass jedem bestimmten Satz der Prozessparameter nur ein Wert des Optimierungsparameters entsprechen muss. In der durchgeführten Forschung wurden die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils im Kontaktbereich als Optimierungsparameter Y gewählt. Spannungen im Kontaktbereich bewirken in der Oberflächenschicht plastische Deformationen, die für das Bearbeitungsergebnis bestimmend sind.

Das analytische Modell des Prozesses soll die Input-Parameter X (unabhängige Variable) und der Output Y (abhängige Variable – Optimierungsparameter) haben. Für die analytische Modellierung sind meistens Modelle in Form von den algebraischen Polynomen benutzt:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \sum b_{ii} X_i^2 + \dots \quad (3.1)$$

Die Gleichung enthält eine Konstante b_0 und die Koeffizienten b_i , b_{ij} , b_{ii} . In der vorliegenden Forschung wird das Modell entwickelt, das 4 Input-Parameter hat und ist mit der folgenden quadratischen Regressionsgleichung beschrieben:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} X_i^2 \quad (3.2)$$

Die für den Prozess gewählten Input-Parameter mit drei gewählten Stufen der Werte sind in der Tab. 1 gegeben.

Tabelle 1 – Input-Parameter

Radius der Werkzeugspitze		Schnittgeschwindigkeit		Zustellung		E-Modul des Werkstoffs	
mm	Kode X_1	m/min	Kode X_2	μm	Kode X_3	GPa	Kode X_4
3	+1	140	+1	10	+1	201	+1
2	0	100	0	8	0	135	0
1	-1	60	-1	6	-1	69	-1

Für die Bestimmung des Konstantes und der Koeffizienten sollen die Experimente mit verschiedenen Sätzen der Input-Parameter durchgeführt

werden. In dem klassischen monofaktoriellen Experiment wird jeder Faktor (Input-Parameter) einzeln variiert, während andere Faktoren auf dem bestimmten Niveau fixiert bleiben. In der vorliegenden Forschung wird ein Vier-Faktor-Experiment verwendet, wobei alle vier Faktoren sich gleichzeitig nach dem bestimmten Gesetz variieren. Mithilfe der statistischen Techniken wurden 24 Experimenten definiert, die die Entwicklung der Regressionsgleichung ermöglichen. Die Input-Parameter für die Experimente sind in der Tab. 2 gegeben.

Tabelle 2 – Die kodierten Input-Parameter für die Experimente

Exp. Nr.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₃	Exp. Nr.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₃
1	1	1	1	1	13	1	1	-1	-1
2	-1	1	1	1	14	-1	1	-1	-1
3	1	-1	1	1	15	1	-1	-1	-1
4	-1	-1	1	1	16	-1	-1	-1	-1
5	1	1	-1	1	17	1	0	0	0
6	-1	1	-1	1	18	-1	0	0	0
7	1	-1	-1	1	19	0	1	0	0
8	-1	-1	-1	1	20	0	-1	0	0
9	1	1	1	-1	21	0	0	1	0
10	-1	1	1	-1	22	0	0	-1	0
11	1	-1	1	-1	23	0	0	0	1
12	-1	-1	1	-1	24	0	0	0	-1

Mithilfe der definierten Experimente sollen die Werte der Optimierungsparameter ermittelt werden. Die Experimente wurden unter Einsatz von FEA durchgeführt. Dafür wurde ein 2D-FEM-Modell des Glättens entwickelt. Das Modell basiert auf der Software „AdvantEdge“ von der Firma Third Wave Systems. AdvantEdge ist eine FEM-basierte Software, die ist auf der dynamischen Modellierung der Zerspanungsprozesse in 2D und 3D spezialisiert. Mit Einsatz von AdvantEdge können Kräfte, Temperaturen, Spannungen, plastische Deformationen im Prozess und Eigenspannungen im Bauteil berechnet werden. AdvantEdge lässt auch eigene CAD-Modelle des Werkzeugs und des Bauteils importieren. Das macht diese Software für die Modellierung des Diamantglättens einsetzbar. Das entwickelte 2D-FEM-Modell des Diamantglättens ist auf der Abb.1 dargestellt.

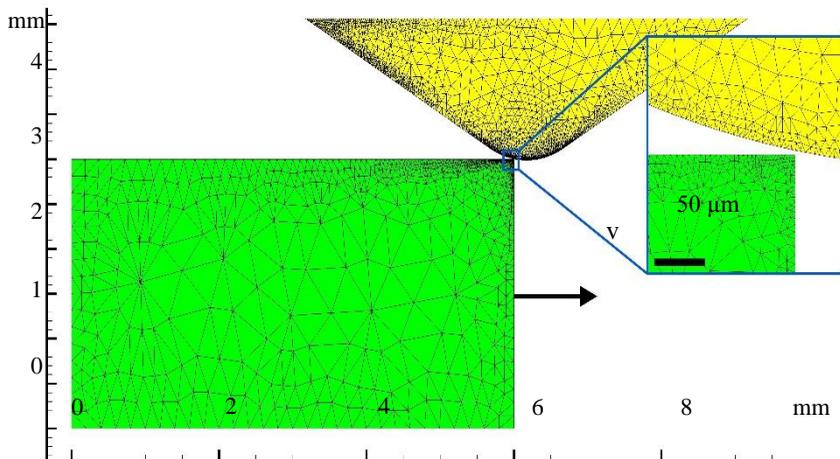


Abbildung 1 – 2D-FEM-Modell des Diamantglätzens

Für die Modelle wurde das Mesh eingestellt. Die minimale Elementgröße für das Werkzeug ist $10\ \mu\text{m}$ und für das Werkstück – $4\ \mu\text{m}$. Mit solchen Meshparametern kann das Werkzeug präzise dargestellt werden. Die kleinen Meshelemente führen zur Erhöhung der Simulationsgenauigkeit und genaueren Ergebnissen. Dafür wurde auch eine dynamische Meshverfeinerung bis zum $2,5\ \mu\text{m}$ eingesetzt. Das heißt, dass im Bereich der höchsten plastischen Deformationen die Meshelemente sich für eine höhere Simulationsqualität verkleinern.

Nach den Parametern aus der Tabelle 2 wurden 24 Simulationen durchgeführt. Als Beispiel ist auf der Abb.2 das Ergebnis aus der Simulation Nr.2 gezeigt.

Nach den Simulationsergebnissen wurden für jedes Experiment die Output-Parameter Y – die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils definiert. Die ermittelten Angaben sind in der Tab.3 gegeben.

Tabelle 3 – Output-Parameter Y

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Wert, MPa	1098	1395	1089	1392	1056	1329	1039	1396
Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Wert, MPa	422	484	416	495	476	485	488	485
Nr.	17	18	19	20	21	22	23	24
Wert, MPa	687	652	673	658	692	691	1196	465

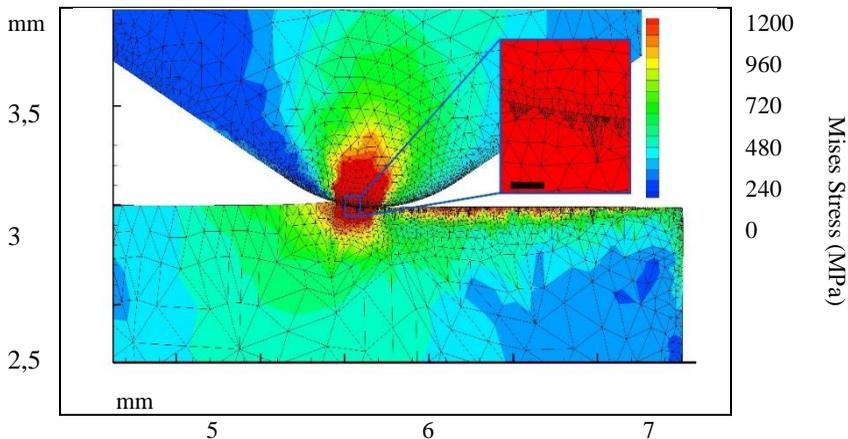


Abbildung 2 – Simulationsergebnis aus dem Experiment Nr.2

Mit den Ergebnissen ist es möglich, eine quadratische Regressionsgleichung für den Prozess erstellen:

$$\begin{aligned}
 Y = & 670,21 - 74,56X_1 - 2,22X_2 + 2,11X_3 + 376,36X_4 + 5,94X_1X_2 & (3.3) \\
 & - 6,56X_1X_3 - 67,69X_1X_4 + 4,31X_2X_3 - 1,31X_2X_4 \\
 & + 16,94X_3X_4 - 0,61X_1^2 - 4,61X_2^2 + 21,39X_3^2 + 160,39X_4^2
 \end{aligned}$$

Mithilfe der entwickelten Regressionsgleichung ist es möglich die im Bearbeitungsprozess entstehenden Spannungen in der Oberflächenschicht für verschiedene Bearbeitungsparameter zu definieren. Um das Ergebnis in MPa zu bekommen, sollen die Input-Parameter kodiert werden. Um eine kodierte Wert der Input-Parameter zu bekommen, soll er nach den Angaben aus der Tab.3 interpoliert werden.

4. Ergebnisanalyse

Die Regressionsgleichung hat in dem vieldimensionalen Raum (Faktorenraum) eine bestimmte Interpretierung – eine Antwortfläche. Die Darstellung der Antwortfläche der Regressionsgleichung mit 4 Faktoren benötigt 5 Dimensionen. Deshalb wurden die Faktoren für die Darstellung ihrer Wirkung auf 2 Diagramme geteilt. Auf der Abb.3 ist der Wirkung vom E-Modul des Werkstoffs und Radius der Werkzeugspitze auf die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils dargestellt. Dabei sind die Schnittgeschwindigkeit und die Zustellung auf dem Niveau 0 fixiert.

Der E-Modul des Werkstoffs hat eine hohe Wirkung auf die im Prozess entstehenden Spannungen aufgewiesen. E-Modul zeigt den Widerstand eines Werkstoffs zu Deformationen unter der Kraftwirkung. Deshalb steigen bei der Bearbeitung eines Werkstoffs mit höherem E-Modul sowie die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils als auch die Spannungen im Werkzeug.

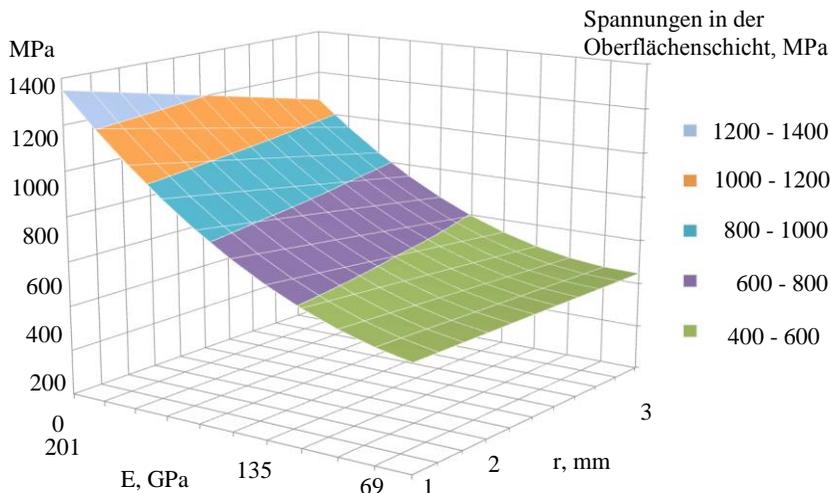


Abbildung 3 – Wirkung des E-Moduls des Werkstoffs und Radius der Werkzeugspitze auf die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils

Abb.3 zeigt auch den Einfluss vom Radius der Werkzeugspitze auf die Spannungen in der Oberflächenschicht. Mit der Steigung des E-Moduls erhöht sich die Wirkung vom Werkzeugradius. Bei den Werkstoffen mit niedrigem E-Modul hat der Werkzeugradius fast keinen Einfluss auf die Spannungen. Deshalb ist es für solche Werkstoffe besser ein Werkzeug mit größerem Spitzenradius einsetzen, weil so die Oberfläche mit kleineren Rauheitswerten entsteht. Für die Werkstoffe mit höherem E-Modul kann man die Werkzeuge mit kleinerem Spitzenradius effizient nutzen, weil sie um 31% höhere Spannungen und höhere plastische Deformationen in der Oberflächenschicht des Bauteils bewirken. Die Belastung der Werkzeugspitze steigt dabei nur um 10,6%. Dieses Ergebnis, das auf der FEM-Modellierung basiert, entspricht auch den Empfehlungen aus Literatur [16].

Die Schnittgeschwindigkeit hat eine große Bedeutung für die Bearbeitungsproduktivität. Deshalb soll sie aus den ökonomischen Gründen möglichst hoch eingestellt sein, aber es gibt immer die Begrenzungsfaktoren. Im

Fall von Diamantglätten ist das die Hitzebeständigkeit der Diamantspitze. Bei den Geschwindigkeiten höher als 200 m/min erhöht sich die Temperatur im Bearbeitungsbereich und das führt zum schnellen Verschleiß vom Diamant aufgrund der Graphitisierung und der Diffusionsprozesse [17]. Deshalb ist das Diamantglätten mit solchen hohen Geschwindigkeiten nicht sinnvoll. Der größte Effekt hat das bei der Stahlbearbeitung. Für eine höhere Bearbeitungsproduktivität soll die Wärmeabfuhr mithilfe von KSS optimiert werden. In Rahmen der Forschung wurde die Wirkung von der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung auf die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils ermittelt. Das Ergebnis ist auf der Abb.4 gezeigt. Bei verschiedenen Geschwindigkeiten ändern sich die Spannungen im Bereich von 24 MPa (667 MPa – 691 MPa). Deshalb hat die Schnittgeschwindigkeit fast keinen Einfluss auf den Deformationsgrad und soll so eingestellt werden, dass der Prozess möglichst produktiv aber ohne Überhitzug bleibt.

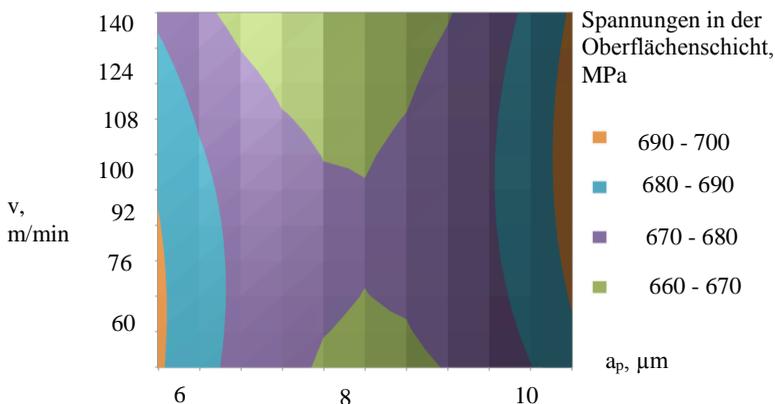


Abbildung 4 – Wirkung der Schnittgeschwindigkeit und Zustellung auf die Spannungen in der Oberflächenschicht des Bauteils

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Zustellung auch nur einen kleinen Einfluss auf die Spannungen in der Bauteiloberfläche hat. Deshalb ist bei der Einstellung der Zustellung wichtig, dass sie die vollständige plastische Deformation der Unebenheiten gewährleistet. Um eine hohe Oberflächengüte und optimale Druckeigenstressungen in der Oberflächenschicht des Bauteils zu gewährleisten, soll die Werkzeugspitze einige μm tiefer als die Linie mit dem 100% Traganteil liegen.

5. Zusammenfassung

In Rahmen der Forschung wurde ein empirisches analytisches Modell des Diamantglättens entwickelt. Das entwickelte Modell ist mit der quadratischen Regressionsgleichung beschrieben und basiert auf den Ergebnissen von den 2D-FEM-Simulationen. Solche Vorgehensweise ermöglicht die Entwicklung eines analytischen Modells eines Prozesses mit einer kleineren Anzahl der praktischen Experimente. Das macht die Entwicklung kosteneffizienter und erhöht die Umweltverträglichkeit. Mit solcher Vorgehensweise zur Modellentwicklung ist es möglich, solche Output-Parameter des Bearbeitungsprozesses zu ermitteln, die man schwer oder gar nicht bei den realen Experimenten messen kann. In dem Fall ermöglicht das entwickelte Modell eine schnelle Berechnung der Spannungen in der Oberflächenschicht eines Bauteils im Kontaktbereich während der Bearbeitung. Die entstehenden Spannungen führen zu den plastischen Deformationen in der Oberflächenschicht des Bauteils und dabei zur Entstehung einer Oberfläche mit der hohen Oberflächengüte und Druckeigenspannungen bis zu 0,4 mm in die Tiefe [18]. Als Input-Parameter nutzt man die für den Prozess wichtigsten Parameter: Radius der Diamantspitze, Schnittgeschwindigkeit, Zustellung und E-Modul des zu bearbeitenden Werkstoffs. Das analytische Modell des Diamantglättens ermöglicht die kosteneffiziente Prozessoptimierung mit möglichst niedrigem Einsatz der kostenintensiven realen Experimenten.

Literaturverzeichnis: 1. *K. Rötger*, Walzen hartgedrehter Oberflächen, Shaker Verlag, Aachen, 2003. 2. *L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, J. Munoa, J.A. Sanchez*, Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing, *International Journal Machine Tools & Manufacture* 45 (15) (2005) 1659–1668, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.007>. 3. *A. Rodriguez, L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri*, Surface improvement of shafts by the deep ball- burnishing technique, *Surface & Coating Technology* 206 (11–12) (2012) 2817–2824, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.045>. 4. *F.J. Shiou, C.H. Chen*, Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process, *International Journal Advanced Manufacturing Technology* 140 (1–3) (2003) 248–254, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00750-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00750-7). 5. *H. Luo, J. Liu, L. Wang, Q. Zhong*, Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 25 (2005) 454–459, <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1959-5>. 6. *N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa*, Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness, *Wear* 129 (2) (1989) 235–243, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(89\)90261-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(89)90261-5). 7. *W. Zhuang, B. Wicks*, Numerical analysis of residual stresses induced by low plasticity burnishing, *Key Eng. Mater.* 23 (3) (2002) 809–814, [http://refhub.elsevier.com/S0924-0136\(14\)00278-7/sbref0130](http://refhub.elsevier.com/S0924-0136(14)00278-7/sbref0130). 8. *Торболю В.М.* Адмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972.–104с. 9. *M. Korzynski*, A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction, *J. Mat. Process. Tech.* 209 (1) (2009) 625–633, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.037>. 10. *F.L. Li, W. Xia, Z.Y. Zhou, J. Zhao, Z.Q. Tang*, Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, 62 (2012) 67-75, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.06.001>. 11. *L. Hiegemann, C. Weddeling, N.B. Khalifa, A.E. Tekkaya*, Analytical prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces, *Procedia Eng.*, 81 (2014), 1921-1926, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.257>. 12. *L. Hiegemann, C. Weddeling, N.B. Khalifa, A.E. Tekkaya*, Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces, *J. Mat. Process. Tech.*, 217 (2015), 193-201, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.008>. 13. *L. Hiegemann, C. Weddeling, A.E. Tekkaya*, Analytical contact pressure model for predicting roughness of ball burnished surfaces, *J. Mat. Process. Tech.*, 232 (2016), 63-77, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.024>. 14. *A. Sagbas*, Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function, *Adv. Eng. Software*, 42 (11) (2011), 992-998, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.021>. 15. *M.M. El-Khabeery, M.H. El-Axir*, Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface

integrity, Int. J. Mach. Tools and Manufacture, 41 (12) (2001), 1705-1719, [https://doi.org/10.1016/S0890-6953\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6953(01)00036-0). 16. Зайцев Б.Г., Шевченко А.С. Справочник молодого токаря / Б.Г. Зайцев, А.С. Шевченко. – М.: Высшая школа, 1979. – 367 с. 17. Клименко С.А. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко; под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская наука, 2017. – 376 с. 18. W. Zhuang, B. Wicks, Numerical analysis of residual stresses induced by low plasticity burnishing. Key Eng. Mater. 23 (3) (2002) 809-814, [http://refhub.elsevier.com/S0924-0136\(14\)00278-7/sbref0130](http://refhub.elsevier.com/S0924-0136(14)00278-7/sbref0130).

Томас Еммер, Флоріан Велцель, Дмитро Борисенко,
Вадим Воропай, Магдебург, Німеччина,
Дак Трунг Нгуен, Ханой, В'єтнам

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИГЛАДЖУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація. Представлена наукова стаття охоплює інформацію щодо розробки математичної моделі процесу вигладжування. Вигладжування є ефективним процесом фінішної обробки виробів з металу. Використання цього виробничого процесу дає змогу значно поліпити чистоту поверхні, покращити властивості поверхні і поверхневого шару, а також підвищити якість оброблюваного виробу. Математична модель процесу вигладжування була створена з застосуванням методу кінцевих елементів. Для цього було використано спеціалізоване програмне забезпечення “AdvantEdge” фірми Third Wave Systems. Застосування імітаційного моделювання методом кінцевих елементів дає можливість зменшити кількість реальних експериментів для розробки моделі та отримати данні про параметри процесу, що важко або взагалі неможливо виміряти під час експерименту. Розроблена математична модель процесу вигладжування полегшує оптимізацію процесу та дозволяє зменшити кількість реальних експериментів, що призводить до поліпшення економічної ефективності та екологічності.

Ключові слова: алмазне вигладжування; метод кінцевих елементів; чотирифакторний експеримент; математична модель процесу; квадратичне рівняння регресії; напруження.

Thomas Emmer, Florian Welzel, Dmytro Borysenko,
Vadym Voropai, Magdeburg, Germany,
Dac Trung Nguyen, Hanoi, Vietnam

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL SMOOTHING WHILE USING FEA

Abstract: The following paper provides insight into developing of a mathematical model of burnishing process. Burnishing is an efficient manufacturing process for surface finishing of metal products. Using this manufacturing process, it is possible to achieve an excellent surface finish, improve surface properties and quality of the product. The mathematical process model was developed using FEA. In the development process was used a specialized software “AdvantEdge” by Third Wave Systems. Usage of FEM-Simulations makes it possible to reduce the number of real-life experiments by developing of the model and the hard-to-measure process characteristics can be defined. The developed mathematical model of the burnishing process makes the process optimization much more efficient and reduces the number of real-life experiments. Thus, this optimization process is more economically attractive and environmental friendly.

Keywords: Slide diamond burnishing; FEM; four-factor experiment; mathematical process model; second-degree regression equation; stresses.