

Optische Verzugsmessung bei der integrierten Wärmebehandlung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder

M. Kästner, J. Seewig, E. Reithmeier
 Institut für Mess- und Regelungstechnik
 Universität Hannover
 Nienburger Str. 17
 30167 Hannover
 markus.kaestner@imr.uni-hannover.de

C. Krause, Fr.-W. Bach
 Institut für Werkstoffkunde
 Universität Hannover
 Schönebecker Allee 2
 30823 Garbsen
 ckrause@iw.uni-hannover.de

Abstract

Durch den Einsatz der integrierten Wärmebehandlung aus der Schmiedehitze wird, durch die signifikante Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Bauteile, eine deutliche Zeit- und Energieersparnis erreicht. Durch die Wärmebehandlung entstehen Verzüge im Bauteil, welche sich entscheidend auf die nachfolgenden Fertigungsschritte auswirken. Zur Bestimmung und Charakterisierung dieser Härteverzüge an Zahnrädern wird die Verzahnungsgeometrie mit Hilfe eines optischen Zahnradmesssystems auf Basis eines Streifenprojektionssensors vollständig und flächenhaft erfasst. Härteverzüge werden visualisiert und durch Definition problemorientierter Kenngrößen quantifiziert. Durch die entwickelten Auswertemethoden ist eine Bewertung der Verzüge untereinander möglich. In den Ergebnissen zeigt sich eine Abhängigkeit der Verzüge von den verwendeten Abkühlparametern.

1 Einleitung

Eine Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder durch integrierte Wärmebehandlung, wie sie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 an der Universität Hannover entwickelt wird, bietet neue Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Fertigung hochbeanspruchter Schmiebauteile mit hoher Qualität. Durch eine integrierte Wärmebehandlung mittels Zweiphasenströmung können weitere Zeit- und Energieersparnisse erzielt werden. Als Werkstoffe werden Vergütungsstähle eingesetzt. Die durch die Wärmebehandlung entstehenden Verzüge im Bauteil spielen insbesondere bei der abschließenden Hartbearbeitung eine wichtige Rolle, und wirken sich somit direkt auf die erreichbare Fertigteilqualität aus.

Aufgrund der vorteilhaften optischen Eigenschaften der präzisionsgeschmiedeten Zahnräder wird für die Verzugsuntersuchungen ein optisches Messverfahren auf Basis strukturierter Beleuchtung (Streifenprojektion) eingesetzt, welches eine schnelle und flächenhafte Erfassung der gesamten Verzahnungsgeometrie erlaubt.

Durch eine Geometrieerfassung vor und nach der Wärmebehandlung wird eine schnelle und aussagekräftige Bestimmung der Härteverzüge ermöglicht.

2 Aufbau des Messsystems

Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GFM eingesetzt, durch das eine Erfassung von ca. 10^6 Messpunkten in einer Belichtungssequenz ermöglicht wird. Das Messsystem verfügt über einen lichtstarken digitalen Mikrospiegelprojektor zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts.

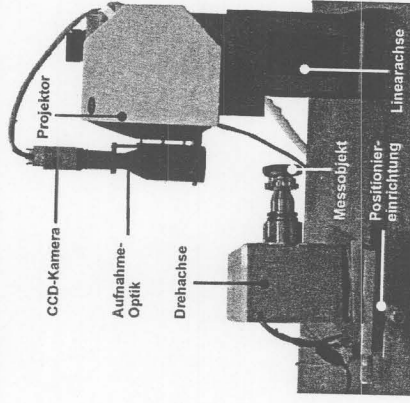


Abbildung 1: Messaufbau mit Streifenprojektionssystem

Der aktuelle Aufbau der Messeinrichtung ist in Bild 1 dargestellt. Der Streifenprojektionssensor ist an einer Linearachse angebracht, wodurch eine hochgenaue Positionierung des Sensors in vertikaler Richtung ermöglicht wird. Zur rotatorischen Positionierung des Zahnrades im Messvolumen wird eine luftgelagerte Präzisionsdreihachse verwendet, die ihrerseits auf einer schwenkbaren Positioniereinrichtung montiert ist. Einerseits kann hierdurch das Werkstück lateral im Messvolumen positioniert werden, andererseits können mit Hilfe der Schwenkeinrichtung abgeschattete Bereiche bei der Messung von schrägverzahnten Zahnrädern minimiert werden.

3 Geometrieerfassung

Da sich die Messunsicherheit von bildgebenden Triangulationssensoren proportional zur Länge der Messfelddiagonalen verhält, bietet es sich an, zur Geometrieerfassung ein möglichst kleines Messfeld zu verwenden [1]. Zur vollständigen Aufnahme der Verzahnungsgeometrie ist eine Aufnahmeanzahl gleich der Zahnzahl des redundant erfassten Zahnrades sinnvoll, wodurch insbesondere die Zahnflankenbereiche großen Steigungen, die maßgeblich zur Messunsicherheit beitragen, aus den Einzelmessungen eliminiert werden, da gerade diese Bereiche in den benachbarten Aufnahmen unter optisch günstigeren Bedingungen enthalten sind.

Die Erzeugung der Gesamtgeometrie erfolgt durch rein geometrische Transformationen der Messpunkte. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine sehr exakte Bestimmung der Dreihachse, die außerhalb des eigentlichen Messvolumens liegt. Die

Strategie zur Bestimmung der Drehachse basiert auf der Durchführung mehrerer Umschlagsmessungen an einem optisch kooperativen Zylindernormal und anschließender Ausmittlung der Achse [3]. Der Durchmesser des Referenzzylinders entspricht in etwa dem Teilkreisdurchmesser der zu messenden Verzahnung. Die Drehachse dient als vorläufige Verzahnungsachse des rekombinierten Zahnrades.

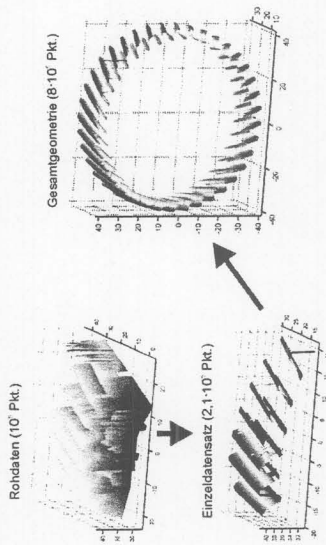


Abbildung 2: Vorgang der Geometrieerzeugung, Achsenbeschriftung in mm

Bild 2 veranschaulicht den Vorgang der Gesamtgeometrieerzeugung. Nach der Vorverarbeitung der Rohdaten reduziert sich die Anzahl der Messpunkte von ca. 10^6 auf ca. $2,1 \cdot 10^6$ pro Einzelmessung. Durch Rotation und Translation der Einzeldaten bezogen auf ein vorläufiges Werkstückkoordinatensystem, welches auf der absolut eingemessenen Drehachse basiert, wird die Verzahnungsgeometrie bestehend aus ca. $8 \cdot 10^6$ Punkten rekombiniert.

4 Wärmebehandlung

4.1 Sprayfeld

Um präzisionsgeschmiedete Zahnräder aus der Schmiedewärme zu härten, wird am Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover der Einsatz einer Zweiphasenspraykühlung (Wasser-Luft) untersucht. Ein Aufkohlen der Randschicht vor dem Schmieden kann nicht zur Anwendung kommen, da durch die Umformung der Kohlenstoff nicht in der gewünschten Konzentration in der Oberfläche verbleibt. Deshalb kommen Vergütungsstähle zum Einsatz, die einen ausreichenden Kohlenstoffgehalt zur Verfügung stellen. Das Sprayfeld, das zur integrierten Wärmebehandlung der im SFB 489 präzisionsgeschmiedeten Zahnräder zum Einsatz kommt, besteht aus neun kreisförmig angeordneten Zweistoffdüsen (Abbildung 3). Im Zentrum befindet sich das Zahnrad, welches von einem Dreibackengreifer fixiert wird. Dieser Greifer ist auf einem Schrittmotor befestigt, so dass eine Schwenkbewegung während des Abschreckens durchgeführt werden kann, um auftretende Inhomogenitäten des Sprays auszugleichen. Das Abschrecken ist durch Prozessparameter gekennzeichnet wie z. B. Wasserdruck, Düsenart und Düsenabstand.

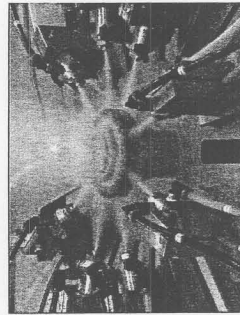


Abb. 3: Sprayfeld für Zahnräder
Um die Wärmebehandlung zu beurteilen, wurden Schlichtbilder angefertigt und Härtemessungen durchgeführt. Es wurden präzisionsgeschmiedete Zahnräder aus den Vergütungsstählen 1.3505 (100Cr6) und 1.7225 (42CrMo4) im Sprayfeld wärmebehandelt [6].

4.2 Spraycharakteristik

Werk die Anwendung eines Wasser-Luft-Sprays kann der Wärmeübergang an der Werkstückoberfläche gezielt beeinflusst werden. Der Wärmeübergangskoeffizient unterliegt in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des Bauteils einer Nichtlinearität, die durch die Leidenfrosttemperatur charakterisiert wird. Die Leidenfrosttemperatur beschreibt den Übergang vom Filmsieden (geringe Wärmeübertragung) zum Übergangssieden (höhere Wärmeübertragung). Bei der Spraykühlung wird die Leidenfrosttemperatur durch die Beaufschlagungsdichte und die kinetische Energie der Tropfen beeinflusst [4]. Deshalb kann die Leidenfrosttemperatur durch eine entsprechende Spraycharakteristik so eingestellt werden, dass sie oberhalb der Werkstücktemperatur liegt, und damit optimale Abkühlbedingungen einstellbar sind. Zur Ermittlung der Spraycharakteristik wurde ein Phasen-Doppler-Anemometer verwendet. Mit diesem optischen Messverfahren können die charakteristischen Größen wie Tropfengeschwindigkeit und Tropfendurchmesser bestimmt werden. Nach PUSCHMANN ist der Wärmeübergangskoeffizient α direkt proportional zur Wasser-beaufschlagungsdichte dm/dt [$kg/(m^2 \cdot s)$]. Der Wärmeübergangskoeffizient $[W/(m^2 \cdot K)]$ lässt sich nach [5] wie folgt darstellen:

$$\alpha = \dot{m} \cdot 16,8 \cdot v^{0,12} \cdot d^{-0,29}$$

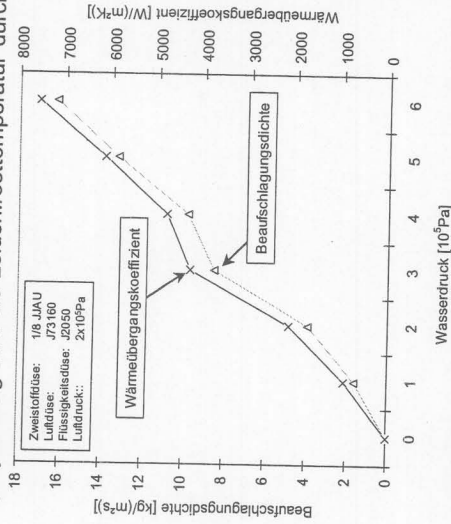
Tropfendurchmesser d [m] und Tropfengeschwindigkeit v [m/s] spielen hier nur eine untergeordnete Rolle [5]. Die Beaufschlagungsdichte wurde im Sprayfeld am Zahnfuß und am Zahnkopf bestimmt. Beispielhaft soll hier eine Konfiguration für 2 bar Luftdruck in Abhängigkeit des Wasserdruckes am Zahnkopf betrachtet werden (Abbildung 4). Aufgetragen ist die Beaufschlagungsdichte und der nach PUSCHMANN berechnete Wärmeübergangskoeffizient des Sprayfeldes in Abhängigkeit des Wasserdruckes.

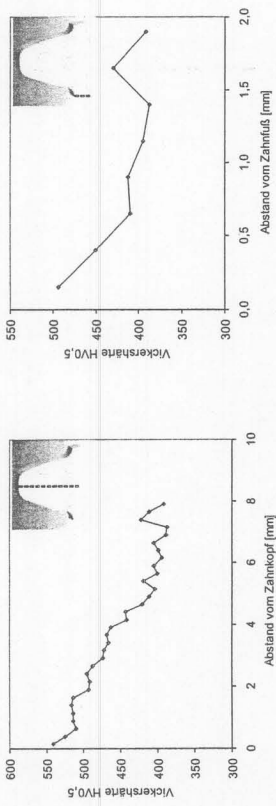
4.3 Härteverlauf und Gefüge

Um die Wärmebehandlung zu beurteilen, wurden Schlichtbilder angefertigt und Härtemessungen durchgeführt. Es wurden präzisionsgeschmiedete Zahnräder aus den Vergütungsstählen 1.3505 (100Cr6) und 1.7225 (42CrMo4) im Sprayfeld wärmebehandelt [6].

Nach der Wärmebehandlung der schrägverzahnten Zahnräder (Modul=2, Zähnezahl=37, Schrägungswinkel=20°) ergibt sich ein Härte-Tiefenverlauf bei dem der Kopf nahezu durchgehärtet ist. Exemplarisch ist in Abbildung 5 der Härtegradient für ein im Sprayfeld gehärtetes Zahnrad aus 1.7225 dargestellt.

Abbildung 4: Wärmeübergangskoeffizient und Beaufschlagungsdichte im Sprayfeld am Zahnkopf



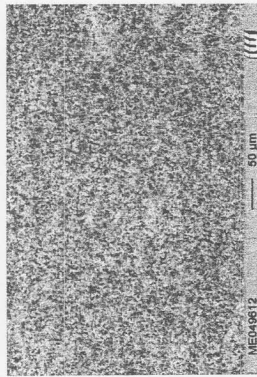


a.)

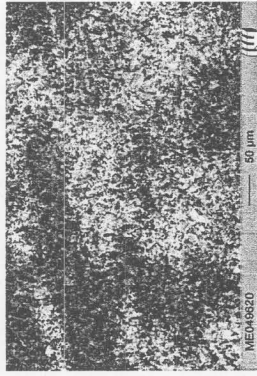
b.)

Abbildung 5: Härtegradient: a) Härteverlauf Zahnkopf, b) Härteverlauf Zahnfuß

Nach DIN 50190 ergibt sich eine Grenzhärte von 450 HV. Die Einhärtungstiefen betragen 0,4 mm am Zahnfuß und 4 mm am Zahnkopf. Unter der Berücksichtigung, dass ein Anlassen aus der Restwärme bei ca. 350 °C stattgefunden hat, konnten zufriedenstellende Härtewerte erreicht werden. Die Schlibilder des betrachteten Zahnrades (Abbildung 6) zeigen im Zahn ein sehr feinkörniges Anlassgefüge. Im Inneren des Zahnrades liegt bainitisches Gefüge mit perlitischen Anteilen vor.



a.)



b.)

Abbildung 6: Gefügebilder gehärteter Zahnräder aus 42CrMo4; Ätzung mit zwei-prozentiger Salpetersäure: a.) Gefüge im Zahn, b.) Gefüge im Inneren des Zahnrades

5. Methoden zur Auswertung der Geometrieabweichungen

Zur Bestimmung und Charakterisierung der durch die Härteverzüge bedingten Geometrieabweichungen stehen eine Reihe von Auswerteverfahren zur Verfügung. Zur Durchführung der Auswertung müssen zunächst die mit Hilfe des Streifenprojektionssensors vor und nach der Wärmebehandlung aufgenommenen Geometriedaten des jeweiligen Zahnrades aufeinander angepasst werden. Die Differenz dieser Messdaten gibt Aufschluss über die während der Wärmebehandlung entstandenen Geometrieänderungen. Für eine erste qualitative Bewertung bietet sich die Visualisierung der Abweichungen in Form eines farbkodierten dreidimensionalen Differenzbildes bzw. in Form eines farbkodierten Stirnschnittes an (Abbildung 7 Mitte). Auf diese Weise können die durch die Wärmebehandlung induzierten vornehmlich systematischen Geometrieabweichungen schnell und sicher erkannt werden. Anhand der Verteilung und Ausprägung der Abweichungen auf der

Verzahnung können zudem bereits Rückschlüsse auf die Ursachen der Härteverzüge gezogen werden.

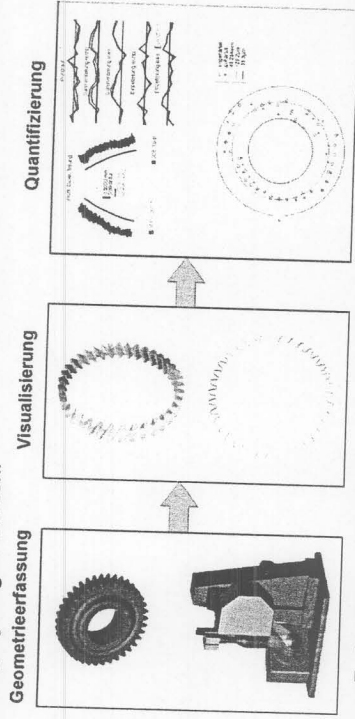
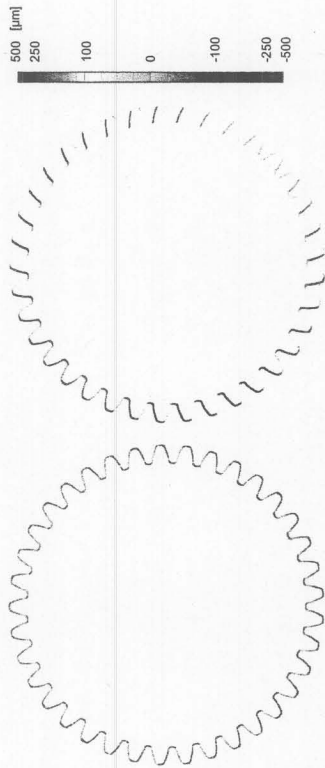


Abbildung 7: Auswertung der Maß- und Formänderung durch die Wärmebehandlung

Zur Quantifizierung der Härteverzüge werden zwei unterschiedliche Verfahren angewandt. Das erste Verfahren ist an die in der taktilen Verzahnungsmesstechnik standardmäßig eingesetzten Methoden zur Analyse von Verzahnungsfehlern anhand der Abweichungen entlang der Profil- und Flankenlinie angelehnt [7]. Neben den Profil- und Flankenlinienabweichungen können mit diesem Verfahren insbesondere Teilungsfehler detektiert werden, welche Aufschluss über die Lageabweichungen der einzelnen Zähne des Zahnrades geben. Das zweite Verfahren befasst sich mit der Auswertung der Rundheit der Zahnkopf- bzw. der Zahnfußbereiche. Zur Durchführung der Auswertung werden die entsprechenden Geometriebereiche zunächst aus den flächenhaften Verzahnungsmessdaten extrahiert. Anschließend werden die Kopf- bzw. Fußkreisradien für jeden Zahn einzeln berechnet. Die Ergebnisse werden in Anlehnung an die DIN ISO 1101 graphisch dargestellt [8]. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der Rundheitsuntersuchungen an den Zahnradern vor und nach der Wärmebehandlung können die Änderungen der Kopf- und Fußkreisradien aufgrund der Härteverzüge erfasst werden.

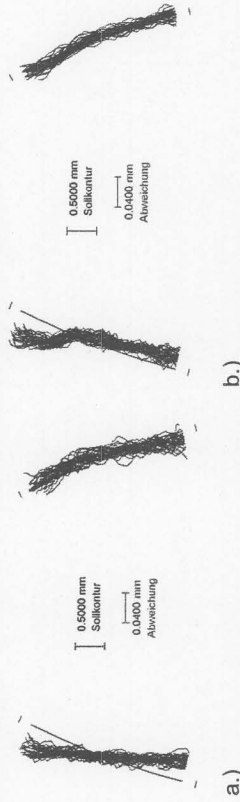
6. Ergebnisse und Diskussion

Um den Verzug, der in der Verzahnung durch die Wärmebehandlung mit dem Zweiphasenspray entsteht, zu beurteilen, soll hier exemplarisch ein Vergleich mit einem konventionell einsatzgehärteten präzisionsgeschmiedeten Zahnrad aus 1.7131 (16MnCr5) vorgenommen werden. Abbildung 8 zeigt eine Gegenüberstellung von zwei Stirnschnittbildern. Links dargestellt ist der Verzug eines Zahnrades aus 1.7225, das im Sprayfeld wärmebehandelt wurde. Im Vergleich dazu ist rechts der Stirnschnitt eines präzisionsgeschmiedeten einsatzgehärteten Zahnrades zu sehen. Das im Sprayfeld gehärtete Zahnrad zeigt den Härteverlauf der oben beschrieben wurde, während das einsatzgehärtete Zahnrad eine Einhärtungstiefe von 0,9 mm hat. Der Stirnschnitt zeigt bei dem im Sprayfeld gehärteten Zahnrad einen homogenen und deutlich geringeren Verzug als beim einsatzgehärteten Zahnrad. Die Maßänderungen durch die Wärmebehandlung im Sprayfeld betragen maximal bis zu 75 µm, während bei der Einsatzhärtung bis zu 125 µm auftreten.



a.)
b.)
Abbildung 8: Stirnschnittdarstellung des Verzuges durch die Wärmebehandlung:
a.) Zahnrad im Sprayfeld wärmebehandelt, b.) Zahnrad einsatzgehärtet

Die Differenz der Rundheiten nach und vor dem Härten beträgt bei Zahnrad a.) im Zahnkopf 5,1 µm und im Zahnfuß -6,1 µm. Die Rundheitsdifferenz für das Zahnrad b.) beträgt im Zahnkopf 38,7 µm und im Zahnfuß 3,7 µm. Andere Zahnräder die im Sprayfeld bei ähnlichen Prozessparametern randschichtgehärtet wurden zeigen Rundheitsdifferenzen bis zu 15 µm. Die durch die Wärmebehandlung induzierten Teilungswinkeldifferenzen zwischen dem gehärteten und dem ungehärteten Zahnrad betragen bei beiden Verfahren im Zahnfußbereich bis zu 0,02° und im Bereich des Zahnkopfes etwa 0,006°. In Abbildung 9 ist beispielhaft für das Zahnrad a.) die Profilienabweichung vor und nach dem Härten im Sprayfeld dargestellt.



a.)
b.)
Abbildung 9: Profilienabweichungen eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades:
a.) vor dem Härten b.) nach dem Härten im Sprayfeld

In der Gegenüberstellung sieht man an der linken Flanke eine Abweichung durch die Wärmebehandlung in Form eines „Knickes“ im oberen Drittel. Die rechte Flanke zeigt keine ausgeprägte Veränderung. Es zeigt sich, dass durch eine Randschichthärtung der Zahnräder aus der Schmiedewärme mittels eines Zweiphasensprays im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren des Einsetzens geringere oder zumindest gleiche große Maß- und Formänderungen entstehen. Die Rundheitsabweichungen fallen geringer aus, während Abweichungen des Teilungswinkels etwa die gleiche Größenordnung haben. Insgesamt zeigt sich in der Stirnschnittdarstellung ein homogener und deutlich geringerer Verzug als beim Einsetzen.

Nach der sich der Wärmebehandlung anschließenden Hartfeinbearbeitung der Zahnräder, konnten Verzahnungsqualitäten von 2-5 erreicht werden.

Literatur

- [1] Koch, A.; Ruprecht, M.; Toedtler, O., Häusler, G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen, Expert Verlag (1998)
- [2] Meeß, K.: Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen, Dissertation, Universität Hannover (2005)
- [3] Kästner, M.; Meeß, K.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Calibration of an Optical 3D Triangulation Sensor for the Evaluation of Precision-Forged Gearwheels; Journal of Physics: Conference Series, ISMTII Huddersfield, 2005 (in Vorbereitung)
- [4] Breuer, M.; Verknüpfung von Wärmebehandlung und Formgebung beim Präzisionsgeschmieden von Verzahnungen, Dissertation, Universität Hannover (2000)
- [5] Puschmann, F.: Experimentelle Untersuchung der Spraykühlung zur Qualitätsverbesserung durch definierte Einstellung des Wärmübergangs, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2003)
- [6] Bach, Fr.-W.; Krause C., Nürnberger F., Schaper M.: Heat treatment of precision forged gears by usage of the forging heat, Suchasni problemy metalurgii, Naukovi visti, Tom 8. Plastychna deformacija metaliv., Dnipropetrovs'k: "Systemni tehnologii", 2005. –S. 488-493.
- [7] ISO 1328-1: Stirnräder (Zylinderräder) – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an gleichnamigen Zahnflanken, Ausgabe 1995-02
- [8] DIN ISO 1101: Technische Zeichnungen, Form- und Lagetolerierung, Form-, Richtungs-, Orts- und Lauf toleranzen, Zeichnungseintragungen, Ausgabe 1985-03