

Werkstofffluss beim Verzahnungswalzen

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hirsch,

PD Dr.-Ing. habil. Verena Kräusel ^a,

Dipl.-Ing. Anna Guk, Technische Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

Prof. Dr.-Ing. Andrey Afonin, Belgorod National Research University, Federal State Autonomous Educational, Institution of Higher Professional Education

^a verena.kraeusel@mb.tu-chemnitz.de

Schlagwörter: Verzahnungswalzen, Werkstofffluss, Walzwerkzeuge, Werkzeugbewegung

Kurzfassung:

Das Verzahnungswalzen ist ein sehr effizientes Verfahren zur Herstellung von Zahnradern. Dieser Prozess ermöglicht eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Qualität der gewalzten Zähne. Dennoch ist der Anwendungsbereich durch die mechanischen Eigenschaften der Werkstück-Werkstoffe (Festigkeitseigenschaften) sowie in Bezug auf die Höhe der gewalzten Zähne begrenzt. Durch Verzahnungswalzen lassen sich Zähne mit einem Zahnhöhenfaktor y von 2,8 an Werkstücken aus duktilen Werkstoffen herstellen [1]. Der Anwendungsbereich des Verzahnungswalzens kann jedoch durch Untersuchungen zum Werkstofffluss erweitert werden.

Einleitung

Verzahnungswalzen erfolgt als erzeugendes Verfahren durch einen Abwälzvorgang mit radialem, axialem oder tangentialem Vorschub des Werkzeuges (Abbildung 1 a) oder als formbildendes Verfahren mit axialem Werkzeugvorschub (Abbildung 1 b). Bei beiden Verfahren kann ein unterschiedlicher Werkstofffluss in Bezug auf die Reihenfolge, wie das Verdrängen des Materials in die Profillücke des Werkzeugprofils und damit das Auffließen zum Formen der Verzahnung erfolgt, realisiert werden [2, 3]. Typische Verläufe des Werkstoffflusses bei der Ausbildung der Verzahnung sind Abbildung 2 zu entnehmen (Axialschnitt).

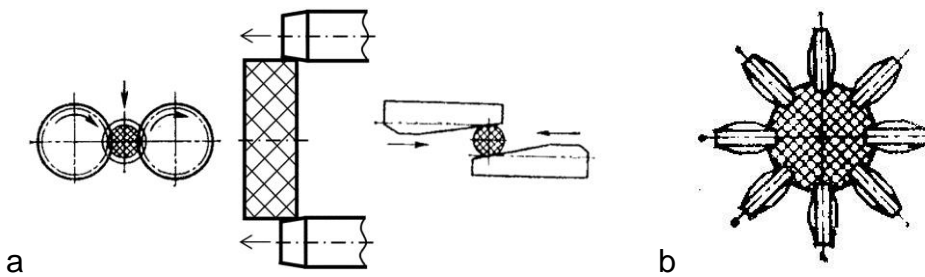


Abbildung 1: Verfahren des Verzahnungswalzens [2]

Das in Abbildung 2 a dargestellte *Vollprofilschema* des Werkstoffflusses ist am meisten verbreitet. Es ist gekennzeichnet durch das stufenweise Eindringen von Werkzeugzähnen in das Werkstück hinein in axialer Richtung (Durchschubwalzen) oder von scheibenförmigen Walzwerkzeugen, die bei jedem Umformschritt die gleiche Walzenform haben. Die Ausformung der Verzahnung erfolgt durch das Walzen mittels zylindrischer Rollen mit axialem Vorschub oder mittels Flachbackenwerkzeugen, die im Anwalzbereich dem Teilkreisdurchmesser des Zahnes entsprechen. Das Ausformen der Verzahnung kann auch mit Hilfe von Walzwerkzeugen gleicher Form durch das Längswalzen realisiert werden.

Der Werkstofffluss in Abbildung 2 b (Schichtschema) wird durch das Eindringen von stumpfen Zähnen des Werkzeuges in das Werkstück hinein realisiert. Dadurch wird der Werkstoff zur Ausbildung der Zahnücke Schicht für Schicht durch die Zähne des Werkzeuges verdrängt, mit reversierender Bewegung der Walzwerkzeuge. In diesem Fall erfolgt das Formen der Verzahnung sowohl durch das Walzen mittels zylindrischer Walzwerkzeuge oder mit Hilfe von Flachbackenwerkzeugen, die im Anwalzbereich dem Außendurchmesser des Zahnes entsprechen als auch mittels Walzen verschiedener Form beim Längswalzen.

Das in Abbildung 2 c dargestellte Schema des Werkstoffflusses unterscheidet sich von den anderen dadurch, dass das Zahnückenprofil am Werkstück durch stufenweise Veränderung des Eingriffswinkels geformt wird. Das Schema kann beim Querwalzen von Verzahnungen unter Anwendung von Flachbackenwerkzeugen und zylindrischen Walzwerkzeugen sowie mittels Walzen unterschiedlicher Form beim Längswalzen realisiert werden. Dieses *Winkelschema* hat auf Grund der aufwendigen Umsetzung keine breite Anwendung in der Industrie gefunden.

Für das Walzen von großen Zähnen kann das in Abbildung 2 d dargestellte Schema angewendet werden. Die Realisierung erfolgt durch das Walzen von Zähnen mit einem tiefe-

ren Profil als das Endprofil, aber mit einer kleineren Zahnlückenbreite. In den letzten Umformstufen wird der Werkstoff von der Zahnflanke in die Zahnlücke eingewalzt. Deswegen kann dieses Schema auch als „Breiten“ bezeichnet werden. Es kann nur durch ein mehrstufiges Walzen beim Längswalzen realisiert werden.

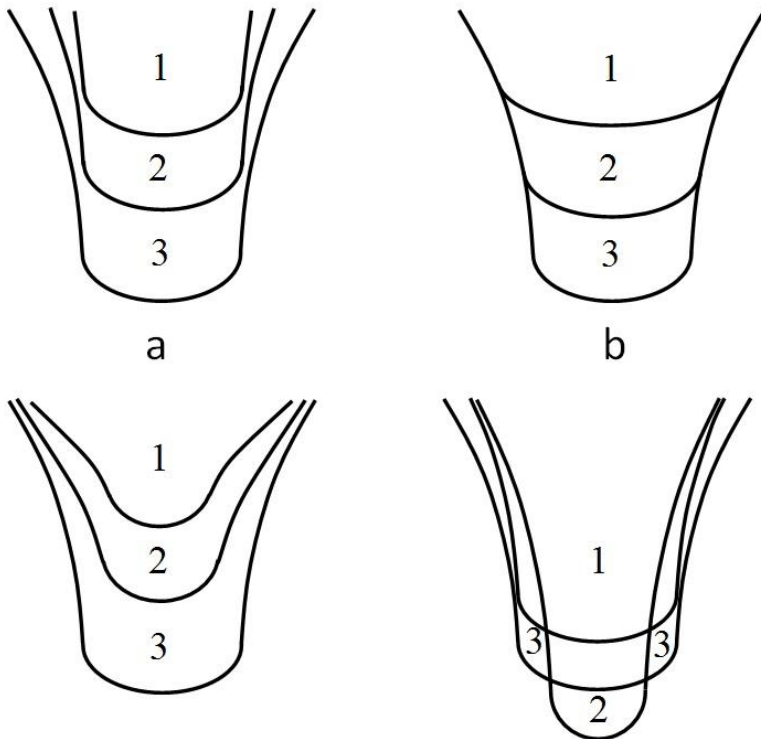


Abbildung 2: Werkstofffluss beim Verzahnungswalzen (Axialschnitt)

In Abbildung 3 werden die existierenden Schemen des Werkstoffflusses als Radialschnitt dargestellt. *Das radiale Schema* (Abbildung 3 a) wird durch das Walzen mit radialem und tangenalem Vorschub ausgeführt (Einstechverfahren), während *das axiale Schema* (Abbildung 3 b) durch das Walzen sowohl mit axialem als auch mit radialem Vorschub von Flachbackenwerkzeugen oder von Walzwerkzeugen spezieller Konstruktion möglich wird (kombiniertes Einstech- und Durchlaufverfahren).

Als sehr aussichtsreich kann das Schema „*selektiv*“ (Abbildung 3 c) bezeichnet werden, das allerdings zurzeit in der Industrie kaum angewendet wird. Bei der Ausführung nach diesem Schema wird der Werkstoff aus der Zahnlücke bereichsweise verdrängt. Das Schema kann mittels verschiedener Verfahren realisiert werden, benötigt allerdings die Anwendung von kompliziert gestalteten Werkzeugen.

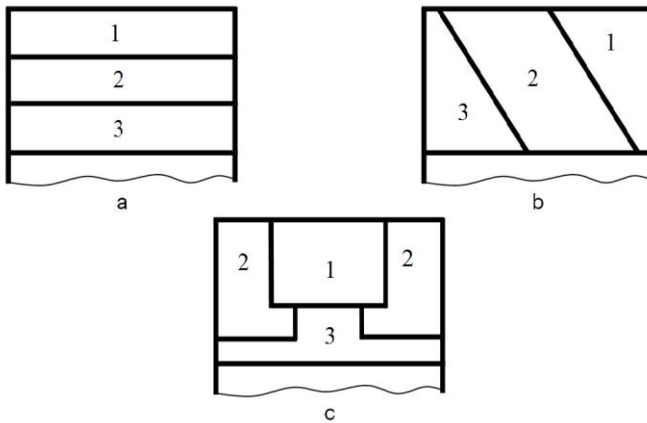


Abbildung 3: Schemen zum Werkstofffluss beim Verzahnungswalzen (Radialschnitt)

Untersuchungen mittels numerischer Simulation

Zur Bestimmung des Einflusses von Werkstoffflusszenarien auf den Prozess des Verzahnungswalzens wurde die Simulation mittels des FE-Programmes DEFORM 3D durchgeführt [4]. Als Beispiel wurde das Querwalzen eines Zahnrades aus Ck45 (1.1191), mit einem Normalmodul von 1 mm, 24 Zähnen und einem Schrägungswinkel von 17° gewählt. Das Walzen erfolgte mit Werkzeugen mit einem Durchmesser von 200 mm mit axialem Vorschub. Bei der Entwicklung des Modelles wurden das Werkstück als starr-plastisch und das Werkzeug als Starrkörper angesehen. Das geometrische Modell des Walzens ist in Abbildung 4 ersichtlich.

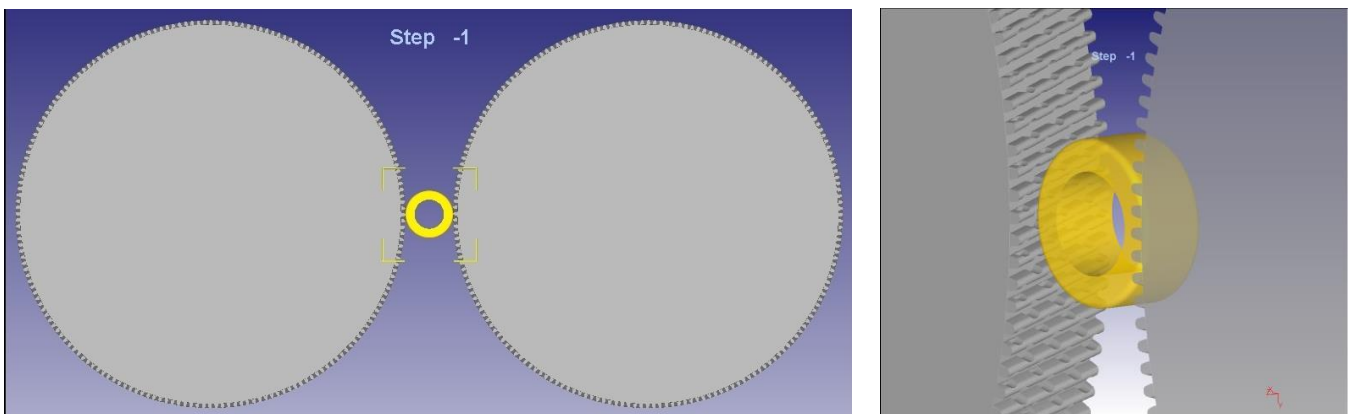


Abbildung 4: Geometrisches Modell des Verzahnungswalzens bei Anwendung des Schemas „selektiv“ für den Werkstofffluss

Die mechanischen Eigenschaften des Werkstück- und des Werkzeug-Werkstoffes wurden durch eine multilineare Fließkurve für den entsprechenden Stahl aus der Werkstoffdatenbank hinterlegt. Die Festlegung der Anzahl der finiten Elemente erfolgte so, dass die Seitenlänge vom kleinsten Element dreimal kürzer als der kleinste Abrundungsradius war. Bei

der Bestimmung von Kontaktbedingungen zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug wurde das Coulomb'sche Reibungsgesetz mit einem Reibungswert von 0,05 angenommen. Für die Modellierung der Schließnaht am Zahnkopf war es erforderlich, den Kontakt „Werkstück-Werkstück“ zu definieren. Die Walzgeschwindigkeit betrug 10 m/min.

Ergebnisse und Diskussion

Beim Verzahnungswalzen ist es wünschenswert, den Werkstofffluss in axialer Richtung zu reduzieren, weil dadurch die Qualität der Ausformung des Zahnkopfes beeinträchtigt wird. Aus den Simulationsergebnissen zum Walzen mittels verschiedener Schemen (Abbildung 5) folgt, dass das in axialer Richtung verdrängte Materialvolumen beim Schichtschema am größten ist, währenddessen dies bei den Schemen „selektiv“ und „Breiten“ nur minimal der Fall ist.

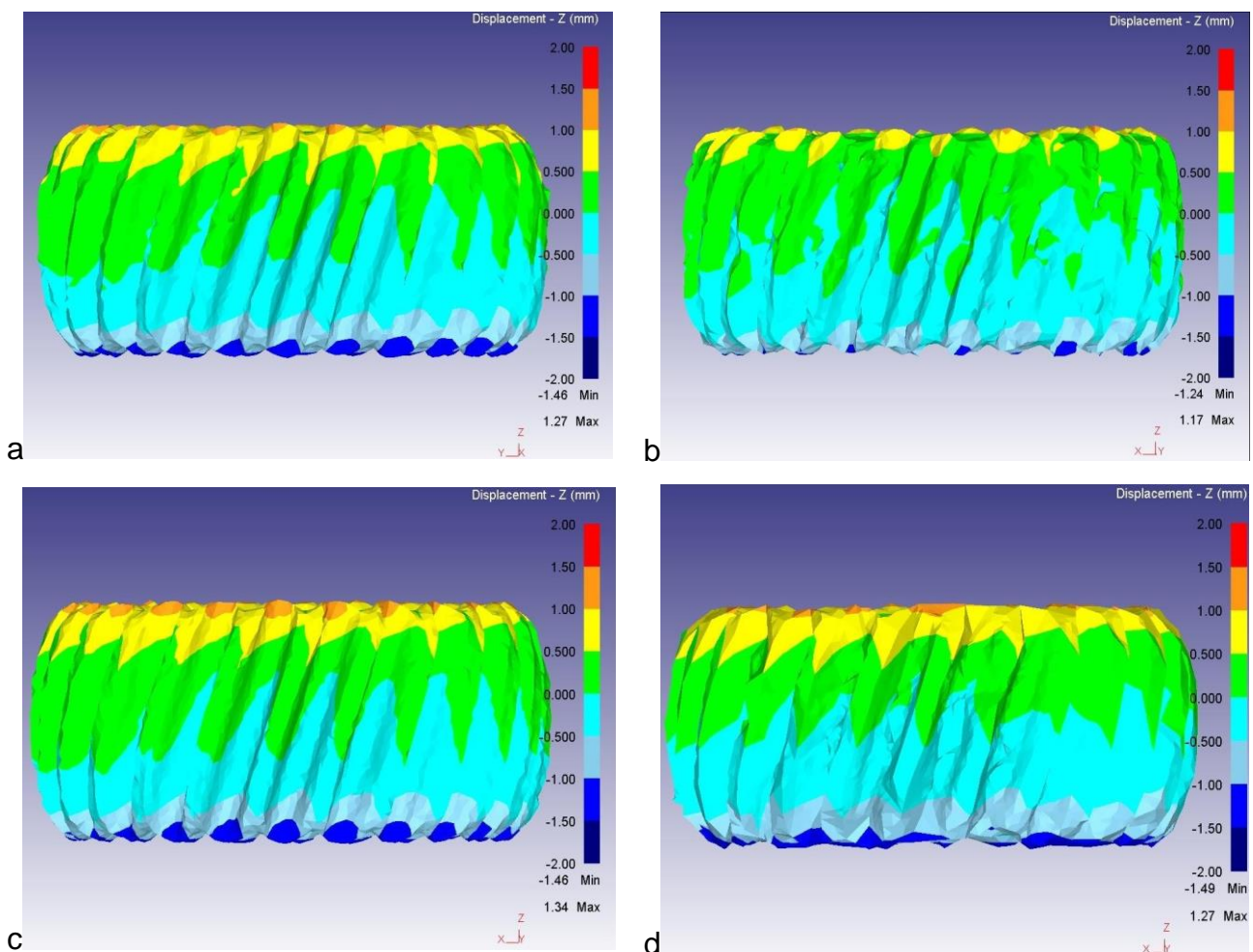


Abbildung 5: Materialverschiebung in axialer Richtung beim Verzahnungswalzen für die betrachteten Schemen des Werkstoffflusses: Vollprofil (a), Schema „selektiv“ (b), Schichtschema (c) und Schema „Breiten“ (d)

Das Simulationsergebnis in Bezug auf die Höhe der Formänderung beim Verzahnungswalzen, das u. a. zur Einschätzung des Grades der Kaltverfestigung dient, ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt.

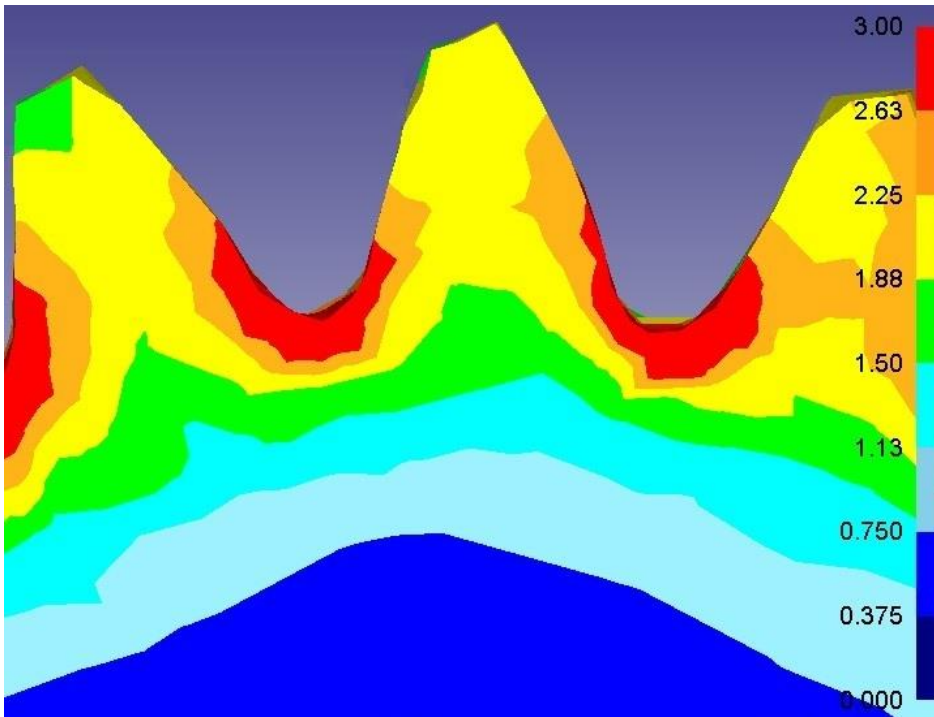


Abbildung 6: Umformgrad beim Verzahnungswalzen für das Schema „Vollprofil“

Die größten Formänderungen werden beim Schichtschema des Verzahnungswalzens erreicht, währenddessen sich die niedrigsten beim Schema „Breiten“ ergeben. Bei der Anwendung des Winkelschemas für den Werkstofffluss entspricht die erzielte Formänderung nahezu der des Schichtschemas. Die Ergebnisse des Verzahnungswalzens mit radialem und axialem Schema unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander.

Die Umformkräfte bei verschiedenen Schemen des Werkstoffflusses sind in Abbildung 7 dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Umformkraft beim Schichtschema am größten ist, während die niedrigste beim Schema „Breiten“ ermittelt wurde.

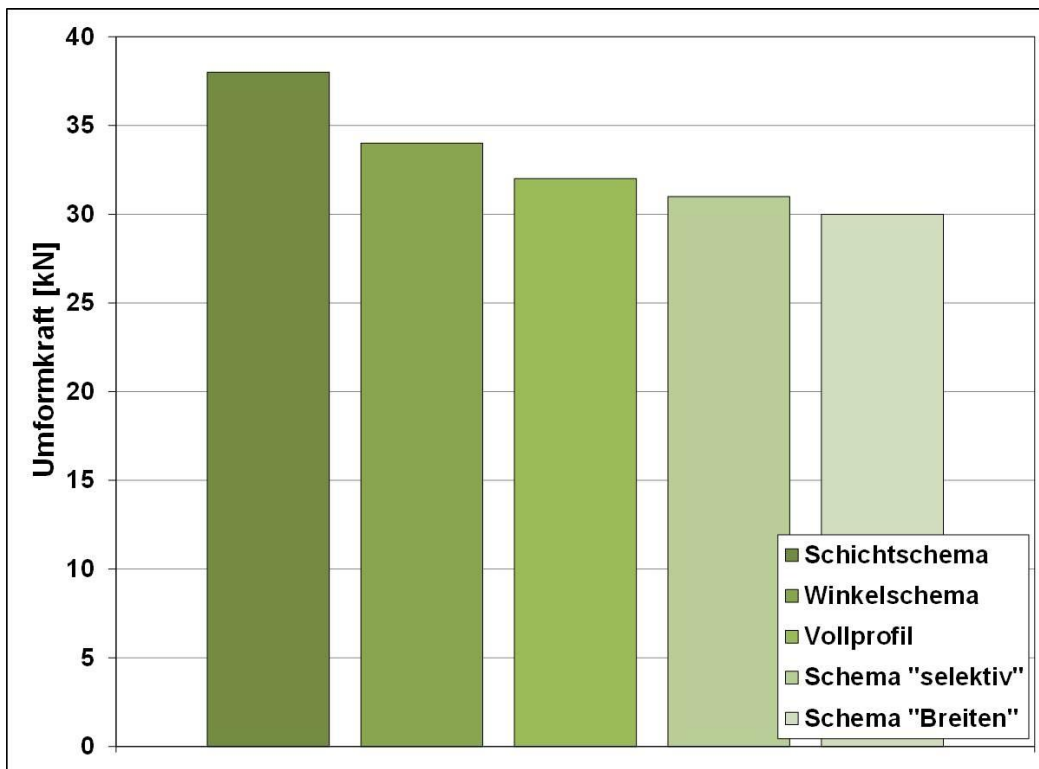


Abbildung 7: Umformkräfte bei verschiedenen Schemen des Werkstoffflusses

Zusammenfassung

Die Auswahl des Schemas für den Werkstofffluss ist bei der Auslegung von Technologien des Verzahnungswalzens sowie für die Werkzeuge zum Walzen von großer Bedeutung. Für die Zahnräder aus weichen niedriggekohten Stählen kann folgendes empfohlen werden:

- Zur Erreichung des maximalen Grades der Kaltverfestigung ist beim Walzen von kleineren Zähnen (mit einem Zahnmodul $< 0,5$ mm) die Anwendung des Schichtschemas erforderlich. Für das Walzen von größeren Zähnen (mit einem Modul oberhalb von 2 mm) ist das Schema „Breiten“ zu bevorzugen.
- Für Zähne mit einem Modul von 0,5 bis 2 mm ist es zweckentsprechend mit dem Vollprofilschema zu walzen, weil sich dadurch niedrige Werkzeugkosten ergeben. Ist es notwendig, einen hohen Grad der Verfestigung beim Walzen von Zähnen mittlerer Größe zu erreichen, wird die Anwendung des Winkelschemas für den Werkstofffluss empfohlen.
- Als universell kann das Schema „selektiv“ des Werkstoffflusses bezeichnet werden. Leider kann der Anwendungsbereich dieses Schemas aufgrund der bislang unzureichenden Forschung auf diesem Gebiet noch nicht exakt spezifiziert werden.

- Beim Verzahnungswalzen an den Bauteilen aus legierten Stählen mit eingeschränktem Umformvermögen oder an thermisch verfestigten Teilen sollen die empfohlenen Werte für den Modul entsprechend der Härtezunahme des Werkstückwerkstoffes angepasst werden.

Literaturverzeichnis

1. Hellfritzschn, U.; Lahl, M.; Milbrandt, M.; Schiller, S.: Walzprozess von Stirnradverzahnungen. 2. Symposium Praxis der Zahnradfertigung, Esslingen, 22.06. – 24.06.2009, S.25 – 34, ISBN: 3-924813-77-9
2. Lyndin W.A.: Instrument dlja nakatyvanija zub'ev i shlitzev povyshennoj prochnosti. – M.: Mashinostroenie, 1988, S. 144
3. Kirichek A.V., Afonin A.N.: Schemes of forming at thread rolling. Proceedings 2011, Joint China-Russia Symposium on Advanced Materials and Processing Technologies, Khabarovsk, Pacific National University, 2011, Pp. 227 – 232.
4. Kretzschmar, J.; Stockmann, M.; Ihlemann, J.; Schiller, S.; Hellfritzschn, U.: Experimental-numerical investigation of the rolling process of high gears. Experimental Techniques, Online First (2013) ISSN: 0732-8818