

С.А. Чевычелов, канд. техн. наук, В.В. Сидорова, Курск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТЯЖНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ

В роботі представлені результати дослідження напруги ріжучих зубів протяжки для отримання гранних отворів, що виникають в процесі різання при різних подачах на зуб, а також вплив зміни переднього кута γ і подачі на зуб на максимальні напруги зуба протяжки.

В работе представлены результаты исследования напряжений режущих зубьев протяжки для получения гранных отверстий, возникающих в процессе резания при различных подачах на зуб, а также влияние изменения переднего угла γ и подачи на зуб S_z на максимальные напряжения зуба протяжки σ .

The results of stress analysis of cutting teeth pulling to get sided holes arising in the process of cutting at different feed rates per tooth, and the impact of changes in the forward angle γ and the feed per tooth for a tooth pulling the maximum voltage.

Использование высокопроизводительных технологических процессов и применение современных конструкций режущих инструментов приводит к увеличению объема производства и качества продукции. Одним из таких процессов, которым обеспечивается стабильное получение точности в диапазоне от 11-го до 6-го квалитетов и шероховатость поверхности до Ra 1,25-0,32 мкм является протягивание. При этом протяжка является сложным и дорогостоящим режущим инструментом, конструктивные решения режущей и калибрующей частей которой напрямую влияют на качество получаемой поверхности.

В связи с многообразием профилей обрабатываемых поверхностей, вариантов конструкции режущей части и схем срезания припуска, общие рекомендации по проектированию данного инструмента не всегда являются рациональными. В настоящее время, опираясь на системы автоматизированных инженерных расчетов, актуальной задачей является исследование вариантов конструкторских решений на стадии проектирования, учитывая конкретные условия производства.

Для передачи вращающего момента в буровых установках необходима разработка протяжного инструмента, который позволил бы сформировать требуемый гранный профиль поверхности на валу-шестерне, рисунок 1.

Исходными данными для проектирования являются: материал заготовки сталь 40X (ГОСТ 4543-71), материал протяжки быстрорежущая сталь P18 (ГОСТ 19265-73); диаметр предварительно обработанного отверстия $D_0 = 72H9^{(+0,06)}$ мм; диаметр отверстия, получаемого протягиванием $D = 80H9^{(+0,074)}$ мм; длина отверстия, получаемого протягиванием $L = 300$ (285)

мм; длина протягиваемой поверхности $L_{np} = 170$ мм; качество отверстия в заготовке – Н9; шероховатость протянутой поверхности (плоские участки) Ra 5 мкм; номинальная тяговая сила протяжного станка $P_c = 204000$ Н.

На основании анализа заготовки, поступающей на протяжную операцию, наиболее рациональным является использование одинарной генераторно-профильной схемы снятия припуска. Согласно рекомендациям [1] в соответствии с группой обрабатываемости (II-ой группой обрабатываемости) и группой качества протягиваемой поверхности (3-ей группой качества), назначаем скорость резания $v = 9,6$ м/мин и подъем на зуб черновых ($S_z = 0,12$ мм), передний угол ($\gamma = 15^\circ$), задний угол ($\alpha = 3^\circ$).

По полученным значениям строим трехмерную модель двухпроходной протяжки, рисунок 2.

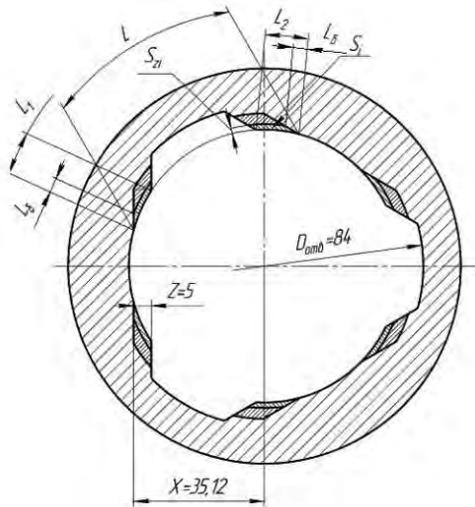


Рисунок 1 – Профиль обрабатываемой поверхности

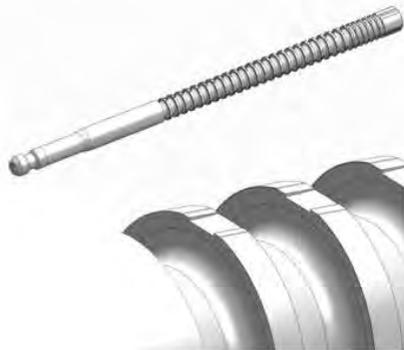


Рисунок 2 – Трехмерная модель протяжки

Для исследования влияния изменения конструктивных параметров полученной модели протяжки на напряженно-деформированное состояние (НДС) необходимо предварительно исследовать ее с целью определения статических узловых напряжений, которые не должны превышать допустимое напряжение при изгибе для быстрорежущей стали Р18, составляющее $[\sigma_{\text{н}}] = 2900$ МПа. На основании этих исследований будет приниматься решение о назначении конкретных значений геометрических параметров протяжки.

Основными факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние протяжки являются подача на зуб S_z и передний угол γ . Исследование проводилось в интервале значений этих параметров $0,01 < S_z < 0,4$ и $5 < \gamma < 25$.

На основании проведенного исследования построены графики влияния изменения максимальных напряжений, возникающих в зубе протяжки, при различных значениях подачи на зуб и переднего угла (рис.3). В выбранном диапазоне при малых значениях переднего угла увеличение подачи на зуб приводит к уменьшению максимальных напряжений, а при больших значениях γ увеличение S_z ведет к увеличению максимальных напряжений, что объясняется ослаблением режущего клина.

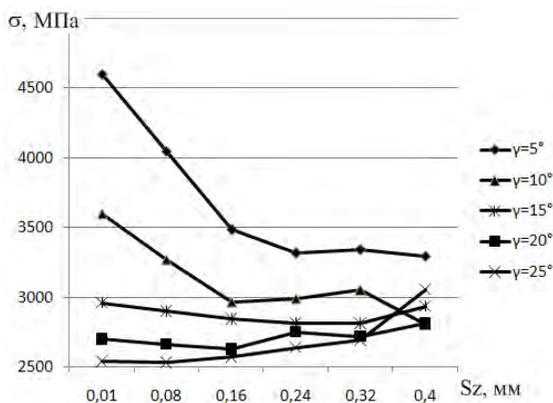


Рисунок 3 – Графики влияния изменения переднего угла γ и подачи на зуб на максимальные напряжения зуба протяжки σ

Как видно из графика, протяжка, спроектированная по стандартной методике, имеет максимальное значение напряжений $\sigma = 2876$ МПа, что практически равняется $[\sigma_{\text{н}}]$. В то же время при выбранном переднем угле $\gamma = 15^\circ$ увеличение подачи на зуб ведет к уменьшению максимальных напряжений, которые достигают своего минимума $\sigma = 2800$ МПа при $S_z = 0,27$ мм. При этом анализ напряжений вдоль режущей кромки показывает (рис.4), что при увеличении подъема на зуб с $S_z = 0,03$ мм до $S_z = 0,2$ мм, напряжения умень-

шаются на 22% с 2800 МПа до 2200 МПа, что увеличивает коэффициент запаса прочности [2]. Однако при $S_z = 0,2$ мм возникает пик напряжения (2797 МПа) на боковой режущей кромке зуба $L_{\delta} = 0,85$ мм, это объясняется тем, что на этом участке величина подачи на зуб S_z уменьшается с 0,2 мм до 0 мм.

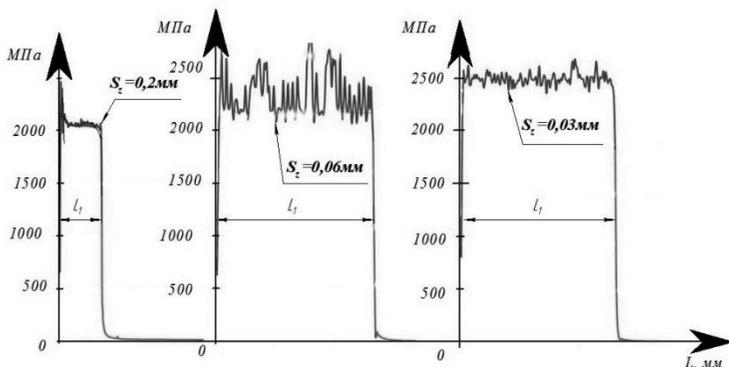


Рисунок 4 – Графики распределения напряжений режущей кромки зуба протяжки при различных S_z

Таким образом, при проектировании протяжек возникает необходимость в исследовании полученной трехмерной модели средствами автоматизированных инженерных расчетов. В приведенном примере выявлено, что назначение переднего угла $\gamma < 15^\circ$ ведет к увеличению максимальных напряжений, которые значительно превышают допустимые. Из рисунка 3 видно, что минимальные значения напряжений возникают при больших передних углах и малых подачах на зуб, однако это ведет к увеличению затрат на инструмент, так как для обработки детали потребуется изготовление трехпроходной протяжки. В то же время анализ напряжений вдоль режущей кромки зуба показывает наличие концентратора напряжений на участке l_{δ} . Таким образом, изменением конструкции режущих зубьев и схемы срезания припуска необходимо вначале избавиться от концентратора напряжений, а затем выбрать рациональные значения S_z и γ . В итоге удалось спроектировать однопроходную протяжку, которая позволяет на заданном оборудовании получить требуемое качество поверхности, при этом максимальные напряжения режущих зубьев составили $\sigma = 2129$ МПа.

Список использованных источников: 1. Маргулис Д.К. Протяжки для обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.; 2. Сидорова В.В., Селезнев Ю.Н., Чевычелов С.А. ЮЗГУ: Современные материалы, техника и технология. Материалы Международной научно-практической конференции. 2011. С. 364-367.

Поступила в редколлегию 15.06.2012

Dr.-Ing. Jakubov, Tschingiz; Universität Simferopol, Ukraine

Dr.-Ing. Duc, Tran Minh; University of Technology, Thai Nguyen, Vietnam

Dr.-Ing. Nguyen, Trong Hieu; University of Science and Technology,
Hanoi, Vietnam

Dr.-Ing. Schmidt, Konrad; Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Deutschland

Dr.-Ing. Emmer, Emmer; Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Deutschland

GRUNDLEGENDE BETRACHTUNGEN ZUR WIRKUNG EINES „INVERSEN“ SPANUNGSVERHÄLTNISSSES ALS BASIS FÜR DIE FRÄSWERKZEUGKONSTRUKTION

The demand for higher productivity and quality, flexibility as well as process safety are marking the development in the field of metal- cutting manufacturing process. Thereby the field of low vibration milling plays a special role. Therefore the development and design of modern milling tools is more and more often affected by novel machining strategies.

The article deals with the development and design of a low vibration milling tool including the reversal of conventional chip- cross- section $b/h > 1$ to the "invers" ratio $b/h < 1$. For this the difference between the two cross sections will be analysed. The focus of the first experimental research is the determination of the effects of reversing the chip- cross- section on the cutting forces as well as chip formation and -forming. The influence of the tool side rake angle (γ_f) in milling with "inverse" chip- cross- section will be studied.

The results gathered in the field of "inverse" chip- cross- ratio provides the base for formulation of design fundamentals and drafts of a novel milling tool with peeling function.

Kurzfassung

Forderungen nach höherer Produktivität und Qualität, Flexibilität sowie Prozesssicherheit kennzeichnen alle Entwicklungen im Bereich der spanenden Fertigungsprozesse. Dabei kommt dem Bereich der schwingungsarmen Fräsbearbeitung eine besondere Rolle zu. Somit wird die Entwicklung und Auslegung von modernen Fräswerkzeugen immer häufiger durch neuartige Bearbeitungsstrategien beeinflusst.

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung und der Auslegung eines neuen schwingungsarmen Fräswerkzeuges unter Einbeziehung der Umkehr des konventionellen Spanungsverhältnis $b/h > 1$, hin zum „inversen“ Verhältnis $b/h < 1$. Hierzu werden die Unterschiede zwischen den beiden Spanungsverhältnissen analysiert. Im Mittelpunkt erster experimenteller Untersuchungen steht die Bestimmung der Wirkungen dieser Umkehr des Spanungsverhältnisses auf die Zerspankraftkomponenten sowie die Spanbildung und -formung. Die Einflüsse des Seitenspanwinkels (γ_f) beim Fräsen mit „inversen“ Spanungsverhältnissen werden ebenfalls betrachtet. Die gewonnen Erkenntnisse zum „inversen“ Spanungsverhältnis bildet die Basis für die Formulierung von Gestaltungsgrundlagen und den Entwurf eines neuartigen Fräswerkzeuges mit Schälfunction.

Einführung und Zielsetzung der Werkzeugentwicklung

Bei der spanenden Bearbeitung von Planflächen durch Stirnfräsen mit leistungsfähigen Fräsköpfen nimmt die Schwingungsproblematik ein entscheidendes Produktivitätskriterium dar. Allgemeine theoretische Ansätze gehen davon aus, dass die Spanungsdicke h einen stabilisierenden und die Spanungsdicke b einen destabilisierenden Effekt bewirken. Somit sollte eine Verringerung des Spanungsverhältnisses ($SV = b/h$) zu einer deutlichen Verbesserung des dynamischen Verhaltens führen, was für das Fräsen unter labilen und semistabilen Bearbeitungsbedingungen von großer praktischer Bedeutung ist. Verfolgt man die Strategie zur Realisierung kleiner Spanungsverhältnisse bis zu $SV < 1$, dann stößt man in einen bisher völlig neuen und unbekanntenen sowie unerforschten Bereich der Frästechnik vor, in dem sich viele Spanungskenngrößen und Wirkmechanismen umkehren. Man spricht von einer „inversen“ Spanungstechnik (lat. invers $\hat{=}$ umgekehrt, entgegenwirkend).

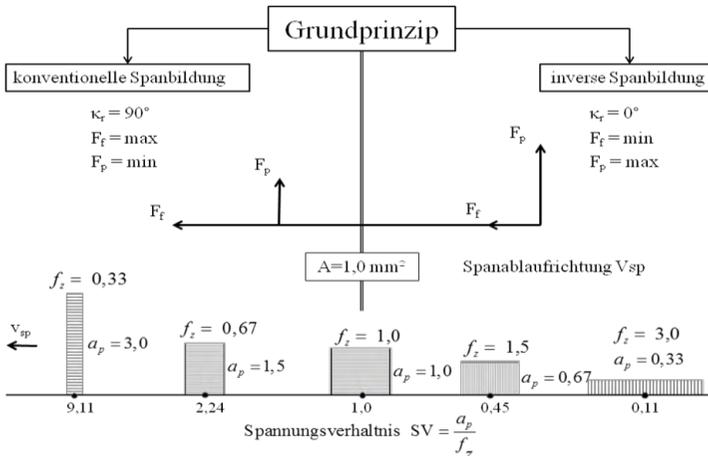


Bild 1 – Grundprinzip der inversen Spanbildung

Das Grundprinzip der inversen Spanbildung ist im Bild 1 schematisch für einen konstanten Spanungsquerschnitt A dargestellt. Die Grenze des Bereiches der inversen von der konventionellen Spanbildung ist $SV \gg 1$ und die Lage der Hauptschneide unter dem Einstellwinkel $\kappa_r = 0^\circ$ bzw. $\kappa_r = 90^\circ$, sowie durch die Umkehrung der Spanablaufrichtung v_{sp} gegeben. Abgeleitet aus dem dargestellten Grundprinzip ergibt sich eine völlig neue Konstellation der Spanungskenngrößen mit folgenden Besonderheiten und Veränderungen:

Tabelle 1 – Parametervergleich zwischen konventioneller- und inverser Spanbildung

konventionelle Spanbildung	→	inverse Spanbildung
$\kappa_r \leq 90^\circ$	→	$\kappa_r = 0^\circ$
$SV \geq 1$	→	$SV \leq 1$
a_p	→	f_z bzw. f_u
f_z	→	a_p
$F_{f \max}$	→	$F_{f \min}$
$F_{p \min}$	→	$F_{p \max}$

Mit den aufgeführten Veränderungen werden folgende Auswirkungen für das Spanungsverhalten im Bereich der inversen Spanbildung erwartet:

- Erhöhung der dynamischen Stabilität im Fräsprozess durch die Maximierung der Passivkraft F_p und deren Ableitung in die Maschinenspindel sowie die Minimierung der Vorschubkraft F_f und die Verringerung der Werkzeugabbiegung
- Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität, da der Vorschub f_u mit der Länge der Werkzeugschneide erhöht werden kann.
- Optimierung der Spanentstehung des Spanablaufs durch eine stark negative Anstellung der Schneide (Seitenspanwinkel $\gamma_f = \text{negativ}$). Es entsteht ein sogenannter „ziehender“ Schnitt mit einem sehr erwünschten Schäleffekt. Dabei dürfte es zu einer geringeren Spanstauchung und niedrigeren Spantemperaturen kommen
- Die partielle Schneidenbelastung sinkt mit der Länge der im Einsatz befindlichen Schneide. Ein großer Vorschub f_u führt nicht nur zur Steigerung der Produktivität, sondern verringert gleichzeitig den Schneidenverschleiß.
- Das Verschleißverhalten wird auch durch die grundsätzlich veränderten Auftreffbedingungen begünstigt. Der Erstaufschlag erfolgt nicht an einer Schneidenecke (Standkriterium Eckenverschleiß ist nicht vorhanden!!) Außerdem liegt eine wesentlich größere Eindringzeit vor (Zeit vom ersten Kontakt bis zum vollen Eingriff), was den Aufschlagimpuls relevant verringert.
- Die lange Schneidekante unter $\kappa_r = 0^\circ$ führt zu einer Verbesserung der Oberflächengüte
- Da die Werkzeugschneidenden im inversen Fräskopf axial gestuft anzuordnen sind, kommen bei kleinsten Schnitttiefen nicht alle Schneiden zum Einsatz, was eine Einsparung an Schneidstoffen zufolge hat. Beim normalen Fräsen verschleifen alle Schneiden unabhängig von der Schnitttiefe.

Grundanliegen der Werkzeugentwicklung

Im Ergebnis der Auswertung von umfangreichen praktischen Erfahrungen und theoretischen Überlegungen konnten die genannten Erkenntnisse über die Besonderheiten und Vorteile der inversen Spanungstechnik sowie das Grundanliegen der Werkzeugentwicklung formuliert werden. Das Grundanliegen der Werkzeugentwicklung besteht darin, sowohl theoretische Grundlagen zu den veränderten spanungsgeometrischen Gegebenheiten zu schaffen, ebenso aber auch den wissenschaftlichen Nachweis über die praktische Realisierbarkeit zu erbringen (siehe Bild 2).

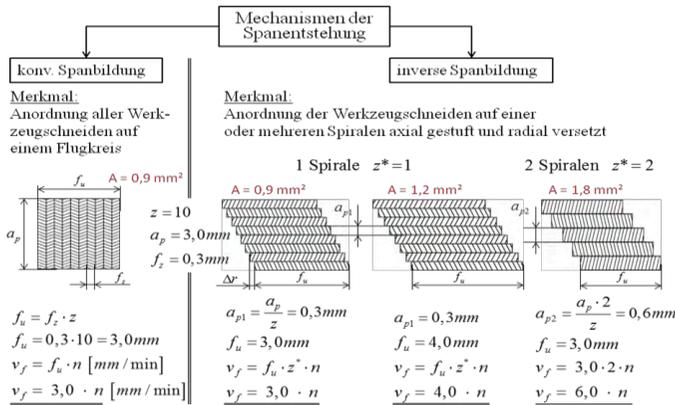


Bild 2 – Mechanismen der Spanentstehung im Vergleich von konventioneller und inverser Spanentstehung

Konkrete Vorschläge für die konstruktive Entwicklung von Schneideinsätzen (Rundschaftprinzip) mit optimierten Geometrien und praxisrelevanten Spanungskenngrößen sowie Konstruktionsvarianten für die Fräsköpfe sind zu erarbeiten. Dabei ist für die Umsetzung ein axialer und radialer Versatz (spiralförmige Anordnung der Schneideneinsätze) der Einzelschneiden erforderlich. Die bereits angedeuteten Vorteile sowie die aufgezeigten Möglichkeiten zur Erhöhung der Produktivität (größeres f_u und Anzahl der Spiralen > 1) sind im Bild 2 schematisch dargestellt.

Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen

Erste versuchspraktische Untersuchungen haben ergeben, dass die bisher dargelegten Besonderheiten und Veränderungen im Bereich der inversen Spanbildung tatsächlich auftreten. Mit dafür entwickelten Schneideinsätzen wurden zunächst erste grundlegende Versuche mit $\kappa_r = 0^\circ$ im Vergleich zu $\kappa_r = 90^\circ$ im Einzahnverfahren durchgeführt. Es wurden die Schnittkraft F_c sowie die Vorschub- und Passivkraft F_f und F_p über dem Spanungsverhältnis SV gemessen. In den Bildern 3, 4 und 5 wird gezeigt das Schnittkraft und Vorschubkraft mit geringerem

Spannungsverhältnis fallen, während - wie vorausgesagt - die Passivkraft ansteigt. Diese Veränderungen der Kräftekonstellation für den inversen Spannungsbereich konnte also durch die ersten praktischen Experimente bestätigt werden.

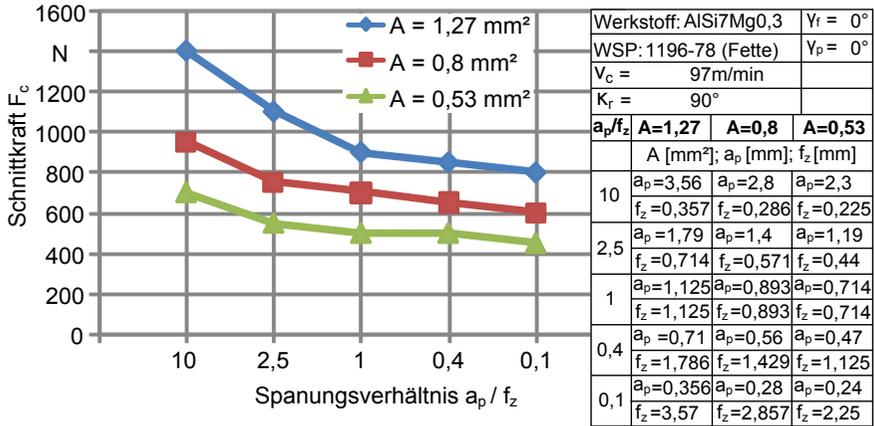


Bild 3 – Schnittkraftverläufe bei sinkendem Spannungsverhältnis und $\kappa_r = 90^\circ$

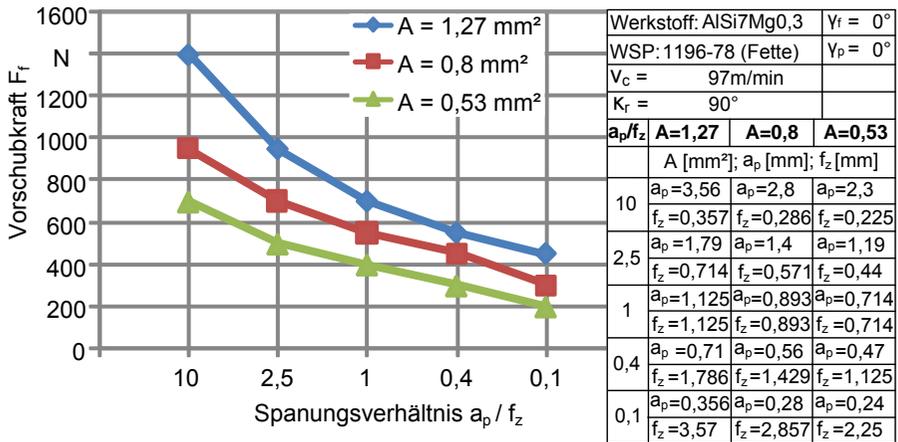


Bild 4 – Vorschubkraftverläufe bei sinkendem Spannungsverhältnis und $\kappa_r = 90^\circ$

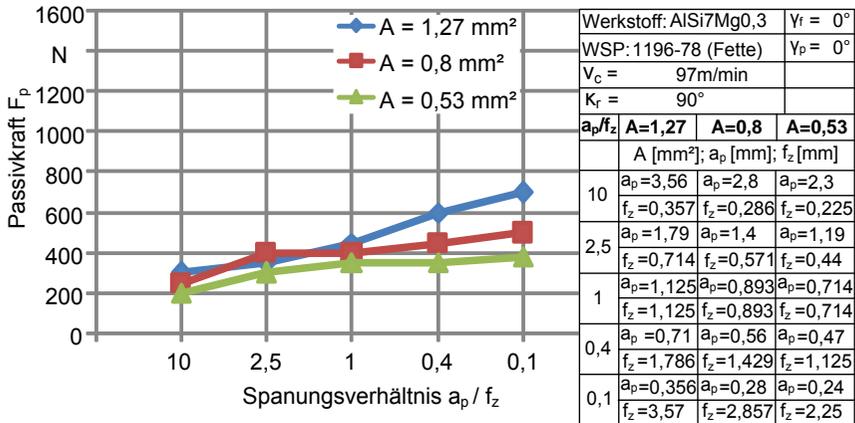


Bild 5 – Passivkraftverläufe bei sinkendem Spanungsverhältnis und $\kappa_r = 90^\circ$

Bei der Betrachtung der erzeugten Späne hat sich erwiesen dass sich die Spanformung und der Spanfluss völlig anders verhalten als im normalen Bereich. Bild 6 zeigt die Umkehr des Spanungsverhaltens, wobei die sich in der Simulation ergebenden Temperaturen im Bereich $SV < 1$ ($SV = 0,1$ gegenüber $SV = 10$) offensichtlich auf eine geringere Verformungsarbeit hinweisen.

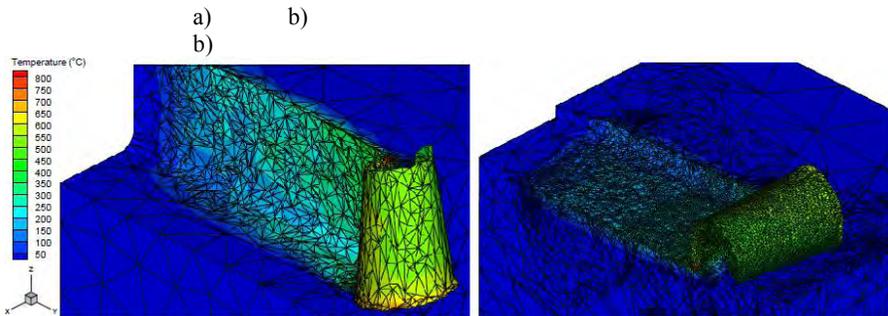


Bild 6 – Simulation des Spanablaufs unter den Verhältnissen von
a) $a_p/f_z=10$ und b) $a_p/f_z=0,1$

Die im Bild 7 dargestellten Späne zeigen sehr deutlich dass der Seitenspanwinkel γ_f die Spanbildung wesentlich verbessert. Bei $\gamma_f = -40^\circ$ entsteht ein sehr günstiger Wendelspan, der durch den Schälfeffekt und einen „ziehenden“ Schnitt verursacht wird.

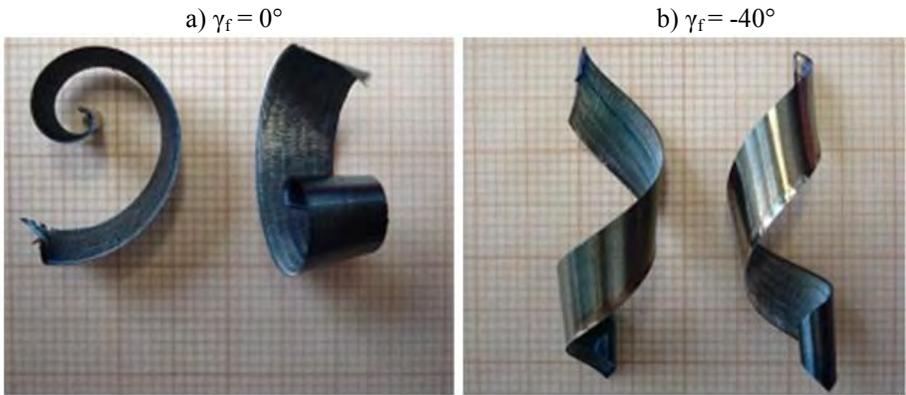
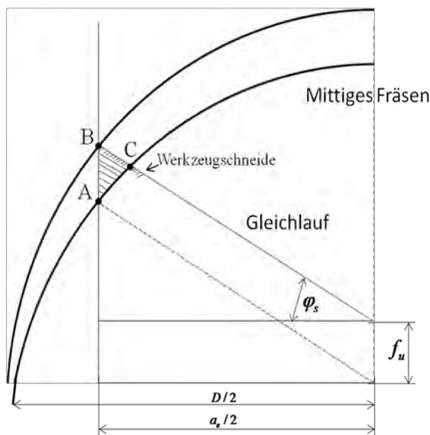


Bild 7 – Vergleich der Späne bei einem Seitenspanwinkel a) $\gamma_f = 0^\circ$; b) $\gamma_f = -40^\circ$

Weiterhin konnte in den bisher durchgeführten Fräsversuchen bereits nachgewiesen werden, dass sich auch das dynamische Verhalten im inversen Spanbereich verbessert. Es ist ein deutlich ruhigeres Schnittverhalten aufgetreten. Offensichtlich ist dies auf die extrem veränderten Auftreffbedingungen zurückzuführen.

Auftreffbedingungen beim inversen Fräsen



Maß der Aufschlaghärtigkeit $\hat{=}$ Weg bzw. Zeit vom ersten in Pkt. bis zum vollen Eingriff Strecke B-C

Bild 8 – Auftreffbedingungen beim inversen Fräsen

In Bild 8 ist das Anschnittverhalten im Fräsvorgang schematisch dargestellt. Die Werkzeugschneide tritt im Punkt A erstmalig in Kontakt mit dem Werkstück in

der Eintrittsebene. Mit zunehmendem Eingriffswinkel dringt das Werkzeug weiter ein und ist erst im Punkt B voll mit dem Werkstoff im Eingriff.

Diese relativ lange Anschnittsstrecke führt zu einem „sanfteren“ Aufschlag mit einem geringen Schwingungsimpuls. Vergleicht man hierzu die Auftreffzustände beim konventionellen Fräsen, dann kann grob eingeschätzt werden, dass hier die Aufschlaghärte etwa um den Faktor 10 größer ist.

Bild 8 macht verdeutlicht weiterhin, dass der Ort des ersten Kontaktes der Schneide mit dem Werkstück völlig anders liegt. Nicht in einer gefährdeten Schneidenecke, sondern vorschubabhängig immer innerhalb der Werkzeugschneide. Es ist mit hoher Sicherheit davon auszugehen, dass die angeführten Gegebenheiten zu einem deutlich verbesserten Verschleißverhalten führen werden.

Zusammenfassung

Die vorliegende Beitrag beschäftigte sich mit der Analyse und der theoretischen Durchdringung des „inversen“ Spanungsverhältnis $b/h < 1$ sowie dem Vergleich mit dem konventionellen Spanungsverhältnis $b/h > 1$, mit dem Ziel einer weiterführende konstruktiven Auslegung eines Schälfräswerkzeuges. Ziel der Untersuchungen war es, die Vorteile des Zerspanens mit „inversem“ Spanungsquerschnitt im Hinblick auf die Kraftkomponenten und die Spanformung darzulegen.

Die Untersuchungen zur Umkehr des Spanungsverhältnisses bei der Fräsbearbeitung für eine Wendeschneidplattengeometrie mit Einstellwinkel von $\kappa_r = 90^\circ$ der Hauptschneide und $\kappa_r = 0^\circ$ der Nebenschneide ergaben folgende Ergebnisse:

- Minderung der Schnittkraft um 30 - 40%,
- Reduzierung der Vorschubkraft bis 70%,
- Erhöhung der Passivkraft um circa 100 -110%.

Das dynamische Verhalten des Fräsprozesses verbessert sich gravierend.

Aus der Änderung des Seitenspanwinkels von 0 auf -40° und dem „inversen“ Spanungsquerschnitt resultiert eine positive Wirkung auf das Anschnittsverhalten. Die Endringzeit der Schneide verlängert sich erheblich und somit wird der Aufschlagimpuls reduziert. Zusätzlich werden durch diese Schneidenstellung Späne in Wendelform erzeugt, die vom Werkzeug weggeleitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse zum „inversen“ Spanungsverhältnis und der Schneidenanstellung unter einem negativen Seitenspanwinkel bilden die Grundlage für die Formulierung von Gestaltungs- und Auslegungsvorgaben für die konstruktive Auslegung eines neuen Schälfräswerkzeuges.