

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 10 · NUMMER 4 · 1988

FILM E 2949

Zerspanen von Stahl Ck 45
Schnittvorgang im Feingefüge
Einfluß der Wärmebehandlung



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Tonfilm (Komm., deutsch oder engl.), 16 mm, farbig (24 B/s). Hergestellt 1983/84, veröffentlicht 1987.

Das Filmdokument ist für die Verwendung in Forschung und Hochschulunterricht bestimmt. Veröffentlichung aus der Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Prof. Dr.-Ing. G. WARNECKE, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Dipl.-Phys. K. SCHAAF; Kamera: J. THIENEL, J. WEISS; Schnitt: J. THIENEL, W. GROSSE, K. SCHAAF.

Zitierform:

WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl Ck 45 – Schnittvorgang im Feingefüge – Einfluß der Wärmebehandlung. Film E 2949 des IWF, Göttingen 1987. Publikation von G. WARNECKE, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 10, Nr. 4/E 2949 (1988), 19 S.

Anschrift des Verfassers der Publikation:

Prof. Dr.-Ing. G. WARNECKE, Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Str., D-6750 Kaiserslautern.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Redaktion: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftliche Ergänzung zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt werden.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (05 51) 20 22 04

ENCYCLOPAEDIA CINEMATOGRAFICA – Editor: H.-K. GALLE
Coeditores: P. FUCHS
Z. NEMES

GÜNTER WARNECKE, Kaiserslautern, und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN
FILM, Göttingen:

Film E 2949

Zerspanen von Stahl Ck 45 – Schnittvorgang im Feingefüge – Einfluß der Wärmebehandlung

Verfasser der Publikation: GÜNTER WARNECKE

Mit 4 Abbildungen

Inhalt des Films:

Zerspanen von Stahl Ck 45 – Schnittvorgang im Feingefüge – Einfluß der Wärmebehandlung. Mit Hilfe einer besonderen Versuchsmethode, bei der der Zerspanvorgang als Orthogonal-schnitt an einer Glasplatte abläuft, ist es möglich, die Vorgänge der Spanentstehung, wie sie sich im Innern des Werkstoffgefüges und an den Werkzeugkontaktzonen abspielen, der direkten Beobachtung zugänglich zu machen. Mikrokinematografische Aufnahmen zeigen das Eindringen eines Schneidkeils in die Randschicht des polierten und geätzten Werkstückgefüges. Dabei können aufgrund der Wechselwirkung von unterschiedlichen Verformungs- und Festigkeitsverhalten der zerspannten Werkstoffe einerseits und Werkstoffbeanspruchung durch den Schneidkeil andererseits, abhängig von den Zerspanbedingungen, verschiedene Spanentstehungsformen und die Bildung von Aufbauschneiden beobachtet werden. Der Vergütungsstahl Ck 45, der durch Wärmebehandlung in vier verschiedene Gefügestände mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften umgewandelt wurde, wurde bei Schnittgeschwindigkeiten zwischen 0,01 und 60 m/min. zerspan. Dabei zeigt sich ein breites Spektrum unterschiedlicher Spanarten und Aufbauschneidenformen, die auf die Wechselwirkung von Werkstoffeinflüssen, Beanspruchungen durch den Werkzeug-schneidkeil und Schnittbedingungen zurückgeführt werden können. Festigkeit, Streckgrenze und Dehnung in Verbindung mit der durch die Schnittgeschwindigkeit wirkenden Zerspanntemperatur stellen einen komplexen Einflußmechanismus dar.

Summary of the Film:

Cutting Ck 45 Steel – The Cutting Process in the Microstructure – The Influence of Heat Treatment. With the aid of a special experimental method, in which the machining operation takes place on a sheet of glass as an orthogonal cut, it is possible to make the process of formation of the chips as takes place inside the material structure and at tool contact points, accessible for direct observation. Microcinematographical films show penetration of the cutting blade into the skin of the polished and etched work piece structure. Hereby, due to the interaction of various types of behaviour from aspects of deformation and resistance of cut material on the one hand, and material stress on the other, caused by the cutting too, depending on cutting conditions, the formation of several chip shapes and built-up edges can be observed. The Ck 45 tempering steel, which was

transformed by heat treatment into four different structural states with different mechanical properties, was cut at a speed of between 0.01 and 60 m/min. A wide spectrum of types of chips and built-up edge shapes can be seen. This is to be attributed to the interrelationship of influences on the work material, strain caused by the cutting wedge and cutting conditions. Resistance, stretch limit and stretching, combined with the cutting temperature caused by the cutting speed, go to create a complex mechanism of different influences.

Résumé du Film:

Usinage de l'acier Ck 45 – Procédé de découpage dans la microstructure – influence du traitement thermique. A l'aide d'une méthode d'essai particulière, dans laquelle l'opération d'enlèvement de copeaux a lieu comme coupe orthogonale sur une plaque de verre, il est possible de rendre accessible à l'examen directe les phénomènes de la formation du copeau, comme ils se produisent à l'intérieur de la structure de la matière et aux zones de contact des outils. Des prises de vue microcinématographiques montrent la pénétration d'un coin dans la couche côté de la structure de la pièce en usinage polie et attaquée chimiquement. Par cela diverses formes d'origine de copeau peuvent être observées en raison des interactions de différents comportements de déformation et de résistance des matières usinées, d'une part, et de la sollicitation de la matière par le coin, d'autre part. L'acier pour trempe et revenu Ck 45 qui a été transformé par le traitement thermique en quatre états variés avec différentes propriétés mécaniques a été usiné à des vitesses de coupe entre 0,01 et 60 m/min. Alors il apparaît un large éventail de formes de copeau et d'arrêtes rapportées qui peut être rapporté à l'interaction de l'effet du matériel, de la sollicitation par le coin coupant de l'outil et les conditions de coupe. La résistance, la limite de ligne apparente d'élasticité et l'allongement en relation avec la température d'usinage produite par la vitesse de coupe, représente un mécanisme d'effets complexe.

Allgemeine Vorbemerkungen

Die Metallbearbeitung mit Hilfe spanender Fertigungsverfahren, Drehen, Bohren, Fräsen usw., ist ein wesentlicher Bestandteil der industriellen Produktionstechnik. Bei der makro- und mikrogeometrischen Formgebung von Konstruktionsteilen, die in verschiedenste Aggregate und technische Erzeugnisse mit definierten Funktionsanforderungen eingebaut werden, z. B. Zahnräder in Getrieben, Kurbelwellen in Motoren oder Uhrengehäuse, wird die Güte der Funktionserfüllung entscheidend durch die Bearbeitungsprozesse bestimmt. Dabei kommt dem Werkstoff, aus dem ein Bauteil hergestellt wird, im Hinblick auf die Funktionseigenschaften, wie auch auf die Bearbeitungseigenschaften eine zentrale Bedeutung zu (WARNECKE [3]).

1.1 Zerspanvorgang und Zerspanbarkeit

Die Bearbeitungseigenschaften bei der spanenden Formgebung, d. h. die Zerspanbarkeit, integrieren alle Eigenschaften eines Werkstoffes, die einen Zerspanprozeß mit den Hauptelementen Werkstück, Werkzeug und Werkzeugmaschine unter Berücksichtigung des jeweiligen spanenden Fertigungsverfahrens beeinflussen. Da eine allgemeingültige Bewertung durch eindeutige Größen mit festgelegter Skalierung nicht möglich ist, wird die Zerspanbarkeit nach den Kriterien – Arbeitszeit, Standzeit, Zerspankraft, Spanformen – beurteilt (VIEREGGE [1]).

Während im allgemeinen das Arbeitsergebnis durch die Oberflächengüte, die Zerspankraft durch die drei Komponenten Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft und die Standzeit aus Verschleißmessungen bestimmt werden, erfolgt die Spanbeurteilung nach einer Einteilung in günstige und ungünstige Spanformen.

1.2 Spanentstehung und Werkstoffbeanspruchung

Der grundlegende Vorgang jeder spanenden Bearbeitung ist die Spanentstehung, bei der ein Schneidkeil in die Randschicht eines Werkstücks eindringt und den in Richtung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück befindlichen Werkstoff vom Werkstück abtrennt. Infolge der dabei von der Spanfläche des Schneidkeils ausgehenden Stauchwirkung wird eine Scherbeanspruchung erzeugt und entsprechend dem Formänderungsvermögen des jeweils zerspannten Werkstoffs ergeben sich unterschiedliche Spanarten, Fließ-, Scher- und Reißspäne. Die vom Werkstück abgetrennten Späne werden über die Spanfläche des Werkzeugs abgedrängt. Die Geometrie dieses Vorgangs ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

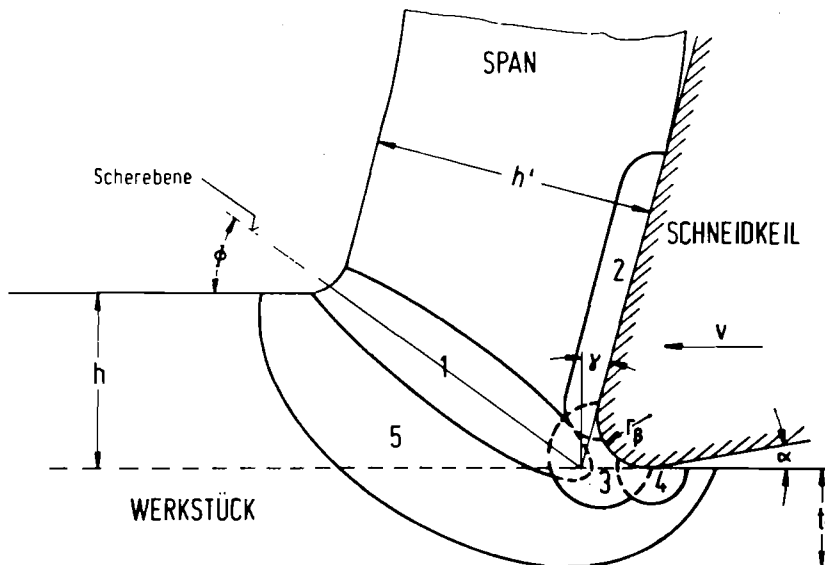


Abb. 1. Geometrie der Spanentstehung und Werkstoffwirkzonen

Die Bereiche 1 bis 5 kennzeichnen die Zonen unterschiedlicher Beanspruchungen und Wirkungen. Die Bereiche 1 und 5 markieren die primäre Werkstoffverformung bei der Spanentstehung, während die Bereiche 2 bis 4 als sekundäre Scherzonen bezeichnet werden, in denen sich aufgrund des Werkzeugkontaktes infolge Reibung und hoher Gleitgeschwindigkeiten Fließschichten an der Spanunterseite und an der Schnittfläche des Werkstücks ausbilden.

Der Vorgang der Spanentstehung ist durch folgende grundlegende Bedingungen und Einflußmechanismen gekennzeichnet:

- kleine Wirkzonen der Werkstoffbeanspruchungen,
- bei praxisüblichen Zerspanbedingungen sehr hohe Wirkgeschwindigkeiten,
- hohe Wirktemperaturen,
- große Spannungs- und Temperaturgradienten,
- mechanische und metallurgische Veränderungen der Werkstoffstruktur und -eigenschaften (Verfestigung, Umkristallisation, Phasenbildung),
- komplexe Kontaktverhältnisse am Schneidkeil (Spannungen, Temperaturen, physikalisch-chemische und metallurgische Reaktionen und Veränderungen),
- nicht quantifizierbare Einflüsse der Mikrostruktur des Werkstoffs und der Rand-schicht.

Vergleichbare Werkstoffbeanspruchungen, d. h. Spannungszustände, Temperaturverhältnisse, Formänderungsgrade, und -geschwindigkeiten sowie Kontaktbedingungen, lassen sich weder bei Standard-Werkstoffprüfversuchen noch bei anderen Prozessen werkstofflicher Formgebung realisieren oder nachbilden, um in Analogie zum Spanentstehungsvorgang spezifische Erkenntnisse über das Werkstoffverhalten zu gewinnen. Veränderungen infolge des Werkzeugverschleißes sind mit zusätzlichen, nicht kalkulierbaren Einflüssen verbunden.

Unter bestimmten Bedingungen lagert sich Werkstückstoff schichtweise im Schneidkantenbereich in Richtung der Spanfläche ab und bildet eine Aufbauschneide an deren Spitzenbereich mit einer sich unregelmäßig ändernden neuen Schneidkante dann die Werkstofftrennung erfolgt. Aufbauschneiden entstehen infolge von adhäsiven Mechanismen zwischen Werkstück- und Schneidstoff in den Werkzeugkontaktzonen sowie aufgrund von Kaltverfestigung des Werkstoffs in der Fließschicht.

1.3 Zerspanung und Werkstoffeinflüsse

Da der Zerspanprozeß bzw. auch die Zerspanbarkeit wesentlich sowohl durch werkstoffmechanische Vorgänge als auch durch Werkstoffeigenschaften beeinflußt werden, kommt den Werkstoffeinflüssen eine zentrale Bedeutung zu. Die Haupteinflußfaktoren bei Stahlwerkstoffen können, wie folgt, eingeteilt werden:

- chemische Zusammensetzung,
- Gefügestruktur (z. B. Ferrit-Perlit, Martensit, . . .),
- nichtmetallische Einschlüsse (z. B. Sulfide, Oxide, . . .),
- submikroskopische Einschlüsse (z. B. Blei, Wismut, . . .).

Während Art, Form, Größe und Verteilung der Einschlüsse durch den Erschmelzungsprozeß und das Gießverfahren bestimmt werden, beeinflussen die Umformung, z. B. Warmumformung durch Schmieden oder Kaltumformung durch Fließpressen, sowie die Wärmebehandlung, z. B. durch Normalisieren, Weichglühen oder Vergüten, die Gefügestruktur. Die metallurgischen, Gefüge-, physikalischen und chemischen Eigenschaften, die durch eine kaum noch überschaubare Fülle spezifischer quantitativer Kenngrößen und qualitativer Merkmale definiert sind, ergeben in Verbindung mit der Vielfalt verschiedener Stahlwerkstoffe ein breites Spektrum von Werkstoffeinflüssen, die in

Wechselwirkung mit Zerspanungsgrößen und -faktoren, wie z. B. den Schnittbedingungen, Vorschub und Schnittgeschwindigkeit, Werkzeuggeometrie und -verschleiß, oder auch Kühlschmiermittel, komplexe Einfluß- und Wirkungsmechanismen bei der Spanentstehung, dem Werkzeugverschleiß, der Oberflächenausbildung usw., auslösen. Verformungs-, Trenn- und Reibungsvorgänge, Verfestigung, Adhäsion und Diffusion werden durch Werkstoffeigenschaften bestimmt und kennzeichnen die Werkstoffeinflüsse auf den Zerspanprozeß.

2. Zur Entstehung des Films

Phänomenologische, visuelle Untersuchungen des Spanentstehungsvorgangs ermöglichen Einblicke in die Wirkzonen im Innern des Werkstoffgefüges und an den Kontaktzonen, die ohne besondere Versuchs- und Aufzeichnungsmethoden nicht zugänglich sind. Neben der Schnittunterbrechungsmethode zur Off-Process-Untersuchung einzelner Spanwurzeln, kann mit Hilfe der Mikrokinematografie in Verbindung mit einer besonderen Versuchstechnik der laufende Vorgang der Spanentstehung (in-process) aufgezeichnet und analysiert werden (WARNECKE [2]).

2.1 Versuchs- und Aufnahmetechnik

Auf einer eigens für die mikrokinematografische Untersuchung entwickelten Versuchs-Drehmaschine läuft der Zerspanvorgang als Orthogonalschnitt an einer Quarzglasplatte

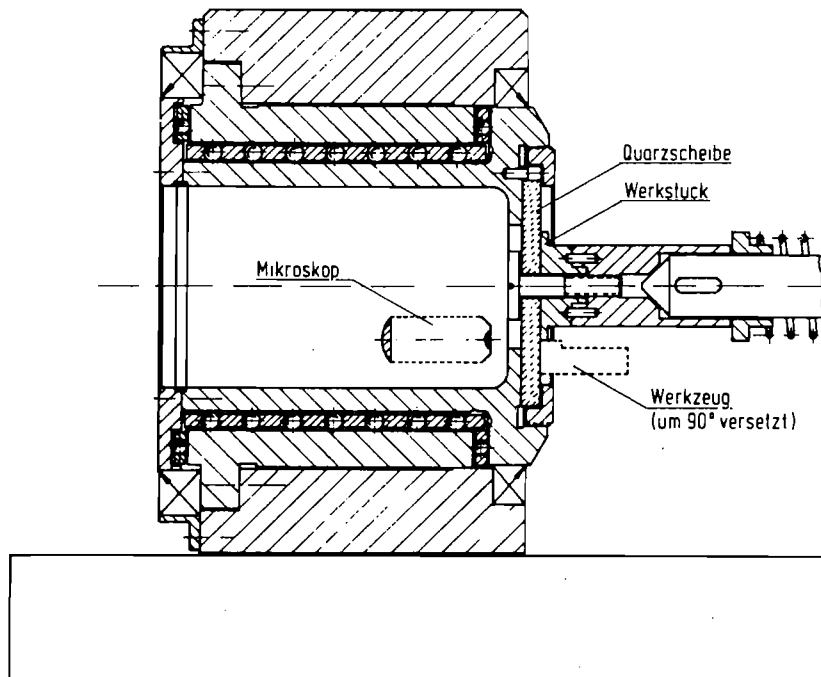


Abb. 2. Zerspankopf in der Versuchs-Drehmaschine

so ab, daß mit Hilfe eines Mikroskops durch diese Glasscheibe die Spanentstehung beobachtet und gefilmt werden kann. Abb. 2 zeigt den Zerspankopf der Versuchsanordnung mit der Wirkstelle von Werkstück und Werkzeug. Das Werkzeug sticht das scheibenförmige, polierte und geätzte Werkstück radial ein, wobei die Glasscheibe die seitliche Werkstoffverformung verhindert und eine definierte Beobachtungsebene darstellt.

Das Bildfeld der Filmaufnahme hat die Abmessungen 0,4 x 0,3 mm, so daß, begrenzt durch die mikroskopische Beobachtung des Werkstoffeingefüges, nur kleine Spannungsdicken bis etwa 50 µm eingestellt werden können. Bewegungsscharfe Filmaufnahmen können mit einer 16 mm-Normalfrequenz-Filmkamera (24 B/s) bei Schnittgeschwindigkeiten bis etwa 0,01 m/min, mit einer Hochfrequenz-Filmkamera (bis 8.000 B/s) bis etwa 2 m/min Schnittgeschwindigkeit durchgeführt werden. Bei darüber hinausgehenden Schnittgeschwindigkeiten sind Bewegungsunschärfen unvermeidlich. Die mikroskopische Filmaufnahme mit einer Auflösung im µm-Bereich, schnelle Vorgänge bis 60 m/min bei kurzen Filmlaufzeiten unter 1 s und kurzen Belichtungszeiten von etwa 1/25.000 s stellen hohe Anforderungen an die Werkstück- und Werkzeugpräparation sowie an die Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik.

2.2 Versuchswerkstoffe

Nachdem bereits in früheren Untersuchungen zur Spanentstehung und Aufbauschneidenbildung mit Hilfe der Mikrokinematografie der Kohlenstoffstahl Ck 45 als Standard- und Vergleichswerkstoff zur Darstellung grundlegender Mechanismen und Einflüsse von Werkstoff und Zerspanung verwendet wurde (WARNECKE et al. [4], [5], [6], [7]), wurde dieser Stahl auch für die mikrokinematografischen Untersuchungen des Einflußkomplexes Wärmebehandlung — Gefüge — Zerspanung ausgewählt. In Abb. 3 sind die Ergebnisse der chemischen Analyse des verwendeten Ck 45 sowie die aus Mikrozugversuchen abgeleiteten mechanischen Kennwerte für Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung für die vier untersuchten Gefügestände mit Kurzangaben über Wärmebehandlung und Gefügestruktur zusammengefaßt.¹

- A) Durch Normalglühen, bei 920 °C in Gußspänen, entsteht das typische schwarz-weiß Perlit-Ferrit-Korngefüge (Ck 45 N).
- B) Beim Weichglühen, bei 920 °C in Gußspänen normalisiert und anschließend bei 700 °C 10 h einformgeglüht, wurden 80 bis 90% des Zementits im Perlit körnig eingeformt (Ck 45 G).
- C) Beim Vergüten wurden die Werkstoffproben bei 820 °C in Wasser abgeschreckt und anschließend bei 700 °C angelassen, so daß ein gleichmäßig feines Vergütungsgefüge aus hochangelassenem Martensit mit starker Karbidausscheidung (kugeligem Zementit) entstanden ist (Ck 45 V).
- D) Das schmiedeperlitische Gefüge wurde durch Erwärmen auf 1160 °C Schmiedetemperatur und kontrolliertes Abkühlen im Preßluftstrom erzeugt, so daß große Perlitkörner von einem Ferritnetz umgeben sind (Ck 45 BY).

¹Die Wärmebehandlungen und Werkstoffprüfungen wurden im Technischen Labor der Fichtel & Saches AG, Schweinfurt, unter der Leitung und mit der fachlichen Beratung von Herrn Dr. BAUMANN und Herrn Dr. BREUER durchgeführt.

Ck 45	C %	Si %	Mn %	P %	S %	AL %	CR %	N %
	0,45	0,25	0,54	0,024	0,027	0,005	0,14	0,004
KENNZEICHNUNG	A		B		C		D	
WÄRME- BEHANDLUNG	NORMALGEGLÜHT BEI 920 °C IN GUBSPÄNEN		WEICHGEGLÜHT BEI 700 °C 10 H		VERGÜTET		ERWÄRMUNG AUF 1160 °C	
GEFÜGE	FERRIT PERLIT		FERRIT / KÖR- NIGER PERLIT		VERGÜTUNGS- GEFÜGE		SCHMIEDE- PERLITISCH	
ZUGFESTIGKEIT R_M (N/MM ²)	653		528		591		774	
STRECKGRENZE R_{EH} (N/MM ²)	347		265		431		367	
DEHNUNG (%)	16,7		25,9		22,6		16	

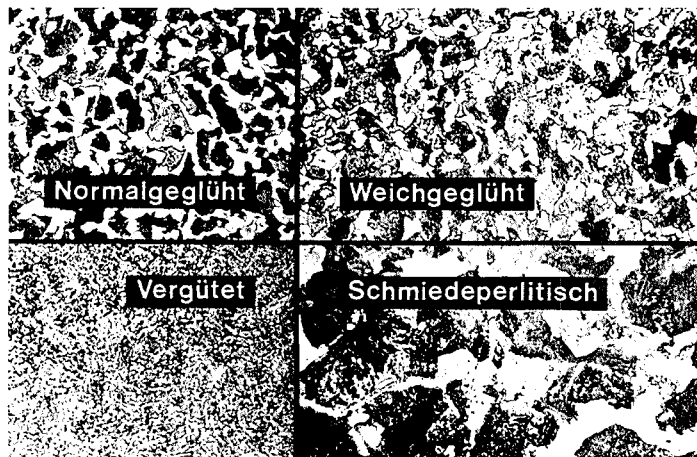


Abb. 3. Legierungsanteile, Gefüge und mechanische Kennwerte des Versuchswerkstoffes Ck 45 bei verschiedenen Wärmebehandlungszuständen

Qualitativ unterscheiden sich diese vier verschiedenen Gefügestrukturen des Ck 45 durch die mechanischen Kennwerte. Im Vergleich mit dem normalisierten Gefüge zeigt das schmiedeperlitische Gefüge bei etwa gleicher Dehnung eine deutlich höhere Zugfestigkeit und eine geringfügig höhere Streckgrenze. Anders verhält es sich mit dem weichgeglühten Gefüge, das erwartungsgemäß eine hohe Dehnung und entsprechend niedrigere Werte für Zugfestigkeit und Streckgrenze aufweist. Beim hochangelassenen Vergütungsgefüge kennzeichnen die hohe Streckgrenze, die relativ hohe Dehnung und die abgesenkte Zugfestigkeit die besonderen Zähigkeitseigenschaften. Zusammenfassend weichen diese drei Kenngrößen vom kleinsten zum größten Wert um über 50% voneinander ab.

2.3 Versuchsprogramm

Da die Schnittgeschwindigkeit aufgrund ihres komplexen Einflusses auf das Verformungs- und Festigkeitsverhaltens, über Formänderungsgeschwindigkeit und -temperatur, von zentraler Bedeutung für den gesamten Zerspanvorgang ist, wurde sie bei den durchgeführten mikrokineatografischen Versuchen zwischen 0,01 und 60 m/min variiert. Ein Spanwinkel von 0° bestimmt die Schneidkeilgeometrie bei allen Versuchen, nur bei der Schnittgeschwindigkeit von 0,01 m/min kam zusätzlich ein Werkzeug mit einem Spanwinkel von 20° und einem Schneidkantenradius von 30 µm zum Einsatz. Daraus ergab sich ein Versuchsprogramm mit 24 Einzelversuchen und entsprechend ein Film mit 24 Einstellungen, aus dem beispielhaft jeweils ein Einzelbild in einem Raster Wärmebehandlungszustand (Spalte) — Schnittgeschwindigkeit (Reihe) dargestellt ist (Abb. 4).

2.4 Filmrealisation

Die Filmaufnahmen entstanden 1985/86 im mikrokineatographischen Labor für Technische Wissenschaften des Instituts für den Wissenschaftlichen Film in Göttingen an einer Spezialdrehmaschine. Die Aufnahmen wurden von IWF-Kameramann J. THIENEL, die Präparationstechnik von E. FRIXE durchgeführt.

3. Filmbeschreibung

Die mikrokineatografischen Aufnahmen zeigen den ebenen Zerspanvorgang, bei dem das Werkzeug durch den Schneidkeil, begrenzt durch Span- und Freiflächenkante, dargestellt wird. Gelegentlich versuchstechnisch bedingte Sekundärercheinungen, wie die Bildung eines dünnen Werkstofffilms aus kleinsten Spanteilchen auf dem Schneidkeil an der rotierenden Quarzglasplatte oder Schlieren und Luftbläschen im Schmierfilm des Immersionsöls, beeinträchtigen die Beobachtung der Spanentstehungsvorgänge nur unwesentlich.

In der Spanentstehungszone gibt es Bereiche unterschiedlicher Spannungs- und Formänderungszustände, die die polierte und geätzte Werkstückoberfläche an der Glasplatte verändern, so daß Rückschlüsse auf die Art der Werkstoffverformung möglich sind. Infolge hoher Druckbeanspruchung wird der Werkstoff gestaucht und gegen die Glasplatte gepreßt. Dabei legen sich die so beanspruchten Oberflächenbereiche mikrogeometrisch dicht an die Glasplatte an, so daß sie gegenüber dem unverformten Werkstoffgefüge, das durch die Ätzung je nach Gefügebestandteil eine Hell-Dunkel-Schattierung auf-

Wärmebehandlung

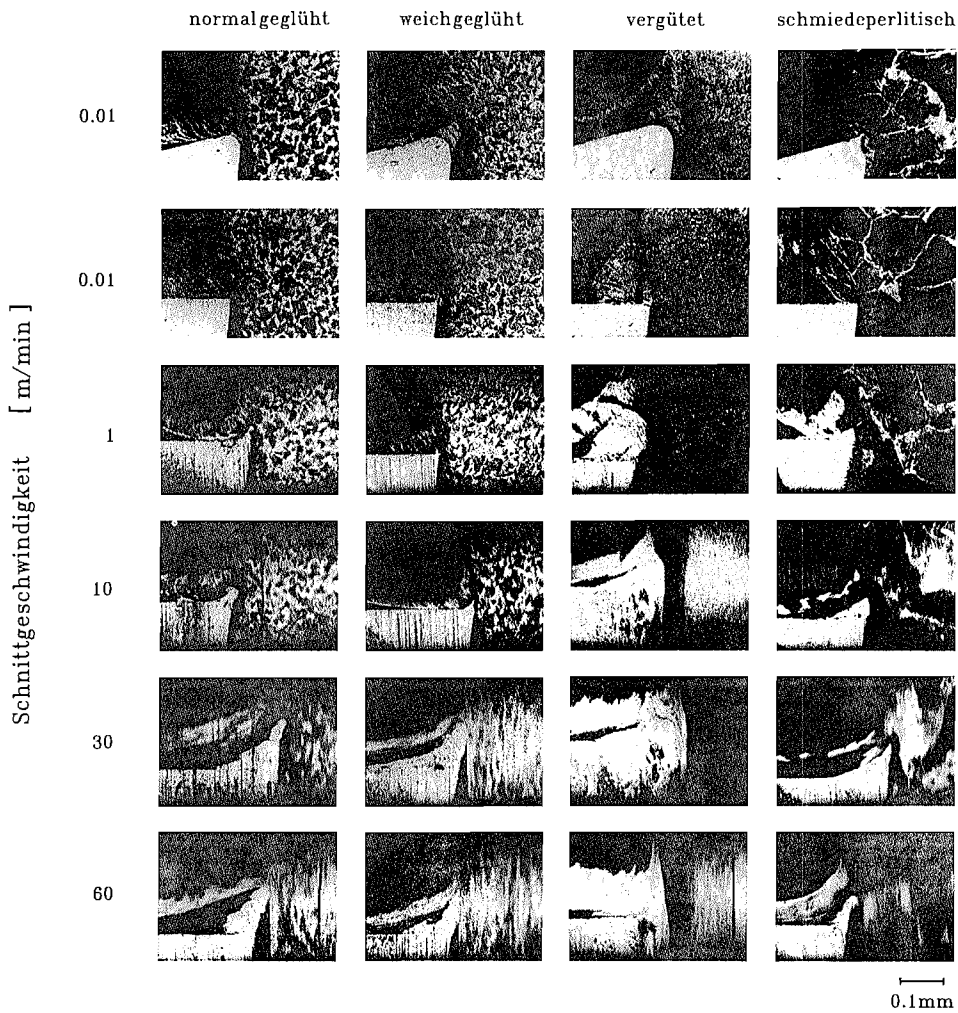


Abb. 4. Einzelbilder aus dem Film „Zerspanen von Ck 45 – Schnittvorgang im Feingefüge – Einfluß der Wärmebehandlung“

weist, heller erscheinen. Oberflächenbereiche, die nicht durch entsprechende Druckbeanspruchung gegen die Glasplatte gepreßt werden, werden durch den Schervorgang oder auch durch Dehnungen infolge von Zugbeanspruchung mikrogeometrisch rau und erscheinen aufgrund der diffusen Reflexion dunkler. Neben der Scherverformung in der Spanwurzel werden auch Verformungen von der Scherzone (Bereich 5 in Abb. 1) sichtbar.

Bei der Spanentstehung geht vom Schneidkeil sowohl eine Stauch- als auch eine Keilwirkung aus. Während die Stauchung mit einer Druckbeanspruchung des Werkstoffs

verbunden ist und die Scherung bewirkt, verursacht die Keilwirkung eine Zugbeanspruchung, unter der das Werkstoffgefüge auseinandergetrieben wird. Da der Gefügezusammenhalt größer als die auftretende Zugbeanspruchung ist, kommt es nicht zu einer Rißbildung vor der Schneide (voreilender Riß). Die Werkstofftrennung erfolgt durch Abscheren. Unter der Zugbeanspruchung durch die Keilwirkung werden die Spanunterseite und die Randschicht des Werkstücks rau und lösen sich teilweise geringfügig von der Glasplatte, so daß die Bereiche dunkler und teilweise unscharf erscheinen. Diese Vorgänge erzeugen beim laufenden Film den Eindruck eines „Saugeffekts“.

4. Wortlaut des gesprochenen Kommentars¹

Bei der spanenden Bearbeitung von Werkstücken wird der grundlegende Vorgang der Spanentstehung wesentlich vom Werkstoff beeinflusst.

Die Eigenschaften und damit auch die Zerspanbarkeit von Stahlwerkstoffen werden nicht nur durch die Legierungsbestandteile, sondern auch durch die Art und Größe der Gefügebestandteile bestimmt.

Diese vier verschiedenen Gefügestrukturen eines Kohlenstoffstahls Ck 45 wurden durch Wärmebehandlung erzeugt. Wärmebehandlungsvorgänge unterscheiden sich durch die Höhe der Temperatur, die Haltezeit bei bestimmten Temperaturen und die Abkühlgeschwindigkeit.

Durch Normalglühen entsteht ein Gefüge mit hellen Ferrit-Kristalliten und dunklem Perlit, in dessen ferritischer Grundmasse Zementitlamellen eingelagert sind.

Beim Weichglühen wird der lamellare Zementit im Perlit kugelig eingeformt.

Das Vergütungsgefüge stellt sich als hoch angelassener Martensit mit ausgeschiedenem kugeligem Zementit dar.

Das grobkörnige schmiedeperlitische Gefüge entsteht durch kontrollierte Abkühlung aus der Schmiedewärme. Große Perlitkristallite sind in ein Ferritnetz eingelagert.

Die unterschiedlichen Gefügeausbildungen bestimmen die mechanischen Eigenschaften des Stahls Ck 45 und damit die Spanentstehung.

Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min

48 B/s; Bildfeldbreite 400 µm

In dem normalisierten Gefüge entsteht bei der sehr geringen Schnittgeschwindigkeit von 0,01 m/min durch gleichmäßige Scherverformung ein Fließspan. Die Spanoberseite erscheint infolge von Scheranrissen rau. Die wechselnde Tiefe dieser Scheranrisse deutet ein unterschiedliches Verformungsvermögen an.

Beim weichgeglühten Gefüge neigt der Stahl Ck 45 zum Kleben. Während der Spanentstehung haftet der Werkstoff auf der Spanfläche und wird gestaucht, bis sich der aufgestaute Werkstoff von der Spanfläche löst und — von der Schneidkante ausgehend — abgeschert wird. So entstehen getrennte oder zusammenhängende Scherspanelemente.

Beim Vergütungsgefüge bewirken gute Verformungsfähigkeit und hohe Streckgrenze die Bildung von Scherspanelementen. Der Werkstoff haftet auf der Spanfläche, wird zunehmend gestaucht, löst sich von der Spanoberfläche und wird als Scherspanelement vollständig abgeschert.

¹ Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.

In dem schmiedeperlitischen Gefüge erzeugt die gleichmäßige Scherverformung einen Fließspan. Scherwinkel, Spanstauchung und Spandicke variieren mit den relativ großen Kristalliten. Die Spanoberfläche verläuft wellenförmig rauh.

Während eine scharfe Schneidkante die Werkstofftrennung begünstigt, entsteht an einer abgerundeten Schneide – hier mit einem Radius von etwa $30\ \mu\text{m}$ – eine Zone intensiver Werkstoffverformung, aus der sich infolge Verfestigung verstärkt Aufbauschneiden bilden.

Beim Zerspanen des Stahls Ck 45 im normalisierten Gefügezustand entstehen bei wechselnder Aufbauschneidenbildung in Verbindung mit dem positiven Spanwinkel von etwa 20° Fließspäne.

Im weichgeglühten Gefüge bewirkt die abgerundete Schneidkante intensive plastische Verformungen, durch die sich Aufbauschneiden bilden. Wechselnde Verformungsvorgänge um den stationären Aufbauschneidkern erzeugen schuppenförmige Werkstoffüberlagerungen an der Schnittfläche und an der Spanunterseite.

Aus dem Vergütungsgefüge heraus bilden sich deutlich markierte Aufbauschneiden. Instabilitäten verursachen ein Wechselspiel zwischen Festsitzen und Abwandern der Aufbauschneiden. Die sich lösenden Teile von Aufbauschneiden drücken sich in die Schnittfläche, so daß diese schuppenförmig rauh wird. Die Fließspanbildung verläuft bei wechselnder Spandicke gleichförmig.

Aus dem schmiedeperlitischen Gefüge hat sich an der Schneidkantenabrundung eine kleine, aber stabile Aufbauschneide festgesetzt. Die Aufbauschneide ergänzt die abgerundete Schneide zu einer scharfen Kante, so daß der Trennvorgang bei diesem Gefüge ohne nennenswerte plastische Verformung abläuft.

Schnittgeschwindigkeit 1 m/min

5800 B/s

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 1 m/min entsteht in dem normalisierten Gefüge ein Fließspan. Eine kleine, stabile Aufbauschneide begünstigt den Spanablauf und bewirkt durch kurzzeitig wechselnde plastische Verformungen im Spitzenbereich Schnittflächenrauheiten.

Das weichgeglühte Gefüge des Kohlenstoffstahles Ck 45 bildet bei 1 m/min Schnittgeschwindigkeit eine kleine stabile, steilaufragende Aufbauschneide, an der ein ungleichmäßiger Fließspan entsteht.

An einer großen Aufbauschneide entsteht aus dem randzonenbeeinflussten Vergütungsgefüge ein ungleichförmiger Fließspan. Die abgespannte Randschicht ist durch die Schuppenbildungen des vorangegangenen Zerspanvorgangs gekennzeichnet. Die Aufbauschneide verändert ihre Form durch wechselnde plastische Verformungen und Schiebungen im Kernbereich.

Das schmiedeperlitische Gefüge hat eine deutlich markierte Aufbauschneide gebildet, an der ein gleichmäßiger Fließspan entsteht. Gelegentliche plastische Verformungsvorgänge im Spitzenbereich und abwandernde Teile verändern Form und Größe der Aufbauschneide. Dabei entstehen an der Spanunterseite und auf der Schnittfläche schuppenförmige Werkstoffüberlagerungen.

Schnittgeschwindigkeit 10 m/min

5800 B/s

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 10 m/min bildet sich aus dem normalisierten Gefüge eine stabile Aufbauschneide. Werkstoffanlagerungen an der Spanfläche schichten sich entgegen der Spanablaufrichtung auf und verbinden sich kurzzeitig mit dem Aufbauschneidenkern. Diese schnell wechselnden plastischen Verformungen an der Aufbauschneide beeinflussen die Fließspanbildung.

Beim Zerspanen des weichgeglühten Ck 45-Gefüges hat sich eine kleine, stabile Aufbauschneide auf dem Werkstoffschneidkeil festgesetzt. Es entsteht ein recht gleichförmiger Fließspan. Durch den Reibkontakt zwischen Spanfläche und Spanunterseite bildet sich infolge Scherverformung eine Fließschicht, die sich als heller Streifen in der Spanunterseite abzeichnet.

Aus dem hochangelassenen Vergütungsgefüge hat sich auf der Spanfläche eine große Aufbauschneide gebildet. Der ungleichmäßige Fließspan mit Ansätzen zur Bildung von Scherpanelementen wird hervorgerufen durch wechselnde, intensive plastische Verformungen an dieser Aufbauschneide. Diese verursachen auch die raue Schnittfläche mit schuppenförmigen Einlagerungen der stark verformten und verfestigten Aufbauschneideteile.

Beim Zerspanen des schmiedeperlitischen Gefüges mit 10 m/min Schnittgeschwindigkeit hat sich eine sehr stabile, scharf markierte Aufbauschneide auf der Spanfläche des Schneidkeils festgesetzt. Nur im Spitzenbereich verändern kurzzeitige, kleine Anlagerungen die Schneidenform. Die Dicke des gleichmäßig abgetrennten Fließspanes variiert auf Grund des von Kristallit zu Kristallit wechselnden Schervorganges.

Schnittgeschwindigkeit 30 m/min

5800 B/s

An einer vergleichsweise großen, hochaufragenden Aufbauschneide entsteht bei 30 m/min Schnittgeschwindigkeit aus dem normalgeglühten Gefüge heraus ein gleichmäßig ablaufender Fließspan, dessen Spanunterseite zwischen Aufbauschneidenspitze und Spanfläche mitunter ohne Reibkontakt zu sein scheint. Durch die über die Werkzeugschneide vorragende, sehr stabile Aufbauschneide entsteht ein Freiflächenspalt.

Die stabile Aufbauschneide aus dem weichgeglühten Gefüge fällt flachverlaufend zur Spanfläche ab und erscheint durch intensive plastische Werkstoffverformung stärker verrundet. Freiflächenspalt und schuppenförmiges Abscheren kennzeichnen die Schnittflächenentstehung. Der Span scheint teilweise frei über Aufbauschneide und Spanfläche zu gleiten.

Bei 30 m/min fließt der Werkstoff im vergüteten Zustand etwa rechtwinklig um den stabilen Aufbauschneidenkern. Während die Spanunterseite durch kontinuierliches Ablösen der Fließschichtbildung schuppenförmig rau entsteht, erscheint die Schnittfläche am Werkstück einigermaßen glatt. Dies liegt daran, daß der Werkstoff unter einem geringfügig negativen Aufbauschneidenfreiwinkel gleichmäßig gleiten kann.

Beim Zerspanen des schmiedeperlitischen Gefüges läuft der Fließspan gleichförmig über eine stabile, scharf markierte Aufbauschneide, die sich im Spitzenbereich infolge gelegentlicher plastischer Werkstoffverformungen, kurzzeitiger Anlagerungen und abgescherter Teile nur wenig verändert.

Schnittgeschwindigkeit 60 m/min

5800 B/s

Bei 60 m/min wirkt sich zunehmend der Einfluß höherer Zerspanntemperaturen aus. Stärkere plastische Verformungen des Stahles Ck 45 in normalisiertem Zustand, in Verbindung mit Anlagern und Abscheren größerer Aufbauschneideteile verändern die kurzzeitig wechselnde Form und Größe der Aufbauschneide sowie Span- und Schnittflächenentstehung.

Der weichgeglühte Stahl hat eine ziemlich stabile Aufbauschneide gebildet, deren Spitze durch intensives Werkstofffließen abgerundet erscheint. Immer wieder schichten sich Werkstoffkeile auf der Spanfläche gegen die Spanablafrichtung auf. Reibung zwischen Spanunterseite und Spanfläche, Scherverformung und Kaltverfestigungen sind die Ursachen für diese Werkstoffanlagerungen, wie auch für die Aufbauschneidenbildung. Beim Vergütungsgefüge sind die Zerspanntemperaturen infolge der Schnittgeschwindigkeit von 60 m/min so hoch, daß eine Kaltverfestigung beim Werkstofffließen um den Werkzeugschneidkeil nicht mehr vorkommt. Es können sich keine Aufbauschneiden mehr bilden. Der Werkstoff fließt gleichmäßig als Span über die Spanfläche und mit dem Werkstoff über die freie Fläche.

Die Aufbauschneidenbildung beim Zerspanen des schmiedeperlitischen Stahlgefüges Ck 45 wechselt in größeren Bereichen durch intensive plastische Verformungsvorgänge, bei kurzzeitigem Aufbauen und Abscheren von Aufbauschneideteilen. Entsprechend ungleichförmig erscheinen Span- und Schnittflächenentstehung.

5. English Version of the Spoken Commentary ¹

Chip formation is the fundamental process of metal cutting and is influenced by several material properties.

These properties of cut material and with them the machinability of steel are determined not only by its alloying constituents but also by the type and size of its structural constituents.

Four different textures of a carbon steel, Ck 45, have been induced by heat treatment. Heat treatment processes differ in temperature, thermal retardation and rate of cooling. Normalizing induces a texture of light ferrite and dark perlite, which is lamellar cementite in a ferritic matrix.

By soft-annealing, lamellar cementite of pearlitic constituency is converted into spheroidal cementite.

The tempered texture appears as martensite annealed at high temperature within precipitated spheroidal cementite.

The coarse-grained ferrite type pearlite is induced by controlled cooling down from forging temperature. Coarser pearlitic constituents are incorporated in a ferritic network. The different texture types determine the mechanical properties of this Ck 45 steel and with them chip formation.

¹The headlines in *italics* correspond with the subtitles in the film.

Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min
48 B/s; Bildfeldbreite 400 µm
(Cutting speed 0,01 m per min
Frame width 400 µm)

At the extremely low cutting speed of 0.01 m per min flow chips are being formed by continuous shearing of normalized structure. Due to a number of small shearing fissures the upper chip surface appears rough. The varying depth of these shearing fissures signifies differential deformability of the surface layer.

The spheroidized structure of the Ck 45 steel tends to adhere. When being formed, chip material sticks to the rake face and is upset until the retained material starts to glide on the rake face and shear off, starting from the cutting edge. In this manner separate or cohesive shear chip elements are formed.

Good deformability and high elastic limit of tempered texture induce formation of shear chips. Material is adhering and being increasingly upset; then detaching from the rake face and shearing off as a completely formed shear chip element.

Continuous shearing of a forgetype pearlitic structure creates flow chips. Shearing angle, chip relation and uncut chip thickness vary in relation to the coarse crystallites. The upper chip surface is developing wavily and appears to be rough.

While a sharp cutting edge favors the process of cutting, a rounded edge, as here with a radius of about 30 µm, induces a zone of high material deformation which causes strain-hardening and, with that, formation of built-up edges.

When cutting the normalized structure of the Ck 45 steel, flow chips are formed at changing built-up edges in conjunction with the positive rake angle of about 20°.

High plastic deformation of the spheroidized structure in the zone in front of the rounded cutting edge induces formation of built-up edges. Changing material deformation at a stationary nucleus of the built-up edge causes flake-shaped material overlapping on the cut surface and the lower chip surface.

Distinctly outlined built-up edges are being shaped out of the tempered steel structure. Instabilities are causing an alternate settling and gliding-off of the built-up edges. The separating particles of the built-up edge are pressed into the cut surface layer which exhibits flakey roughness. Flow chip formation proceeds consistently with varying chip thickness. When cutting the forgetype texture, a small and stable built-up edge has settled at the rounded cutting edge and flow chips are being formed.

The built-up edge has filled up the zone in front of the rounded nose and has thus shaped a sharp cutting edge that causes material separation without considerable plastic deformation of this structuretype in the zones of contact.

Schnittgeschwindigkeit 1 m/min
5800 B/s
(Cutting speed 1 m per min)

With a cutting speed of 1 m per min flow chips are formed in the normalized structure. A small, stable built-up edge favors chip's running off and causes roughness of the cut surface by quickly varying plastic deformation on the apex of the built-up edge.

When cutting the spherodized structure of this carbon steel Ck 45 with 1 m per min a discontinuous flow chip is running off from a small, stable, high rising built-up edge.

At a big built-up edge, discontinuous flow chips are being formed out of the surface-influenced structure of the tempered steel. The cut surface of the workpiece has been determined by the preceding cutting process and shows flakes. The shape of the built-up edge is varying by changing plastic deformation at the apex and shearing deformations of the nucleus.

When cutting forgetype structure, a distinctly outlined built-up edge has been formed and is determining the formation of continuous flow chips. The shape and size of the built-up edge are varying through momentary deformations, accumulation, and slipping away of small particles. Flake-shaped overlappings of material thereby appear at the lower chip surface and the cut surface of the workpiece.

Schnittgeschwindigkeit 10 m/min

5800 B/s

(Cutting speed 10 m per min)

At a cutting speed of about 10 m per min a stable built-up edge has been shaped out of the normalized texture. Material deposits are adhering and accumulating contrary to the chip running direction on the rake face, momentarily linking up with the built-up edge. These momentarily changing processes of shaping the built-up edge influence flow chip formation.

When cutting the spherodized texture of Ck 45 steel a small, stable built-up edge has accumulated on the cutting wedge of the tool, and a continuous chip is running off. Friction in the zone of contact between rake face and chip causes shearing in the lower surface, and a flow layer appears as a bright ribbon.

The martensite annealed at high temperature has induced a big built-up edge on the rake face. Fluctuating plastic deformation is intensely varying the shape of the built-up edge and causing discontinuous flow chips with initiation of shear chip formation. These also cause the rough cut surface with flakey inclusions of the strongly deformed and strain-hardened particles of the built-up edge.

When cutting the forgetype structure at 10 m per min: cutting speed, and at first small, but increasingly built-up edge is being shaped in connection with continuously alternating deposition and shearing-off. Its shape and size varies irregularly, momentarily jutting out the cutting edge of the tool so that a gap occurs between cut surface and clearance face and correspondingly the uncut chip thickness increases.

Schnittgeschwindigkeit 30 m/min

5800 B/s

(Cutting speed 30 m per min)

When cutting the normalized structure of the Ck 45 carbon steel at a cutting speed of about 30 m per min., a continuously running flow chip is being formed at a large, high angle towered built-up edge. Temporarily, the flow chip seems to glide without any contact and friction between the apex of the built-up edge and the rake face of the tool. Because the stable built-up edge juts out, a clearance gap has occurred.

A stable built-up edge, formed out of the spherodized steel-structure, appears more

strongerly rounded with intensive material deformation and is more extended with a near-horizontal transition to the rake face. Temporarily, free gliding of the chip over built-up edge of the rake face, a clearance gap, and flaky shearing off, characterize processing under these conditions.

When cutting at 30 m per min., the tempered-type material flows nearly rectangularly around a stable built-up edge nucleus. The lower surface of the chip is developing flakey roughness because of variation in the flowing layer. Compared with that, the cut surface of the workpiece appears smooth because the material glides on a short section of the built-up edge with a slightly negative clearance angle.

When cutting the forgetype structure, material in the lower chip surface and in the cut surface runs continuously around a stable, well marked built-up edge. At the apex only temporary small deformations and momentary depositing and shearing-off of small particles occur.

Schnittgeschwindigkeit 60 m/min

5800 B/s

(Cutting speed 60 m per min)

At a cutting speed of about 60 m per min., increased affects of higher cutting temperature influence built-up edge processing of normalized type Ck 45 steel. Shape and size of built-up edges, chip formation, and cut surface vary momentarily through material deformation, depositing and shearing-off of larger sections of the built-up edge.

The spheroidized type of the steel Ck 45 produces a stable built-up edge, whose apex appears rounded because of intense material flow. Again and again material wedges are piled up on the rake face contrary to the chip running direction. Friction between lower chip surface and rake face, shearing, and strain-hardening cause these material deposits as well as built-up edge formation.

Because of the higher mechanical properties of the tempered texture at a cutting speed of about 60 m per min., the cutting temperature is so high that strain-hardening no longer more occurs when material flows around the cutting wedge of the tool, and therefore a built-up edge no longer occurs. Material is flowing continuously with the chip on the rake face as with the workpiece around the cutting edge.

When cutting Ck 45 forgetype steel, built-up edge formation changes over a wide range through intensive deformation, momentary accumulation and shearing-off of sections of built-up edge. Chip and cut-surface shaping are correspondingly irregular in appearance.

6. Literatur

- [1] VIERGE, G.: Zerspanen der Eisenwerkstoffe. Düsseldorf 1970.
- [2] WARNECKE, G.: Spanentstehung metallischer Werkstoffe. Gräfelfing b. München 1974.
- [3] WARNECKE, G. und P. BACH: Werkstoffeinflüsse auf Spanbildung und Zerspanbarkeit von Stahl. Tagungsband. DGM-Seminar, IFW Universität Hannover, 29./30. Oktober 1987.

7. Filmveröffentlichungen

- [4] WARNECKE, G., und G. HUMMEL (IWF): Zerspanen metallischer Werkstoffe – Spanentstehung – Schnittvorgang im Feingefüge. Film C 1246 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von G. WARNECKE und G. HUMMEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 1/C 1246 (1979), 28 S.
- [5] WARNECKE, G., und G. HUMMEL (IWF): Zerspanen metallischer Werkstoffe – Aufbauschneidenbildung – Schnittvorgang im Feingefüge. Film C 1247 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von G. WARNECKE und G. HUMMEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 2/C 1247 (1979), 26 S.
- [6] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 – Schnittvorgang im Feingefüge – Einfluß des Schwefelgehaltes. Film E 2506 des IWF, Göttingen 1982. Publikation von G. WARNECKE, unter Mitarbeit von G. HUMMEL (IWF) und J. THIENEL (IWF), Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 4/E 2506 (1983), 23 S.
- [7] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 – Schnittvorgang – Einfluß der Walzrichtung. Film E 2693 des IWF, Göttingen 1982. Publikation von G. WARNECKE unter der Mitarbeit von G. HUMMEL und J. THIENEL (IWF), Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 5/E 2693 (1983), 24 S.

8. Abbildungsnachweis

Abb. 1–4: G. WARNECKE.