

VERSCHLEIß VON HARTMETALLWERKZEUGEN UND IHRE ZUVERLÄSSIGKEIT BEI DER ZERSPANUNG

Von

J. HARASYMOWICZ

(Eingegangen am 15. Juli 1973)

Vorgelegt von Prof. Dr. I. KALÁSZI

Beurteilung des Festigkeitsverschleißes von Werkzeugschneiden und die Klassifizierung der Kennzeichen

Die Einführung von Hartmetallwerkzeugen hatte zur Folge, daß sich die bisherigen Begriffe als unzureichend erwiesen. Es handelt sich um die Begriffe in Verbindung mit dem Schneidenverschleiß in Form der Änderung der Schneidengestalt infolge des Abriebs [5], [6], [8], wie z. B. Verschleißmarkenbreite an der Freifläche B_v , welche nach der typischen Verschleißkurve (Abb. 1, Kurve B) verläuft. Es ist eine neue Konzeption [5], [6] (A. J. KASCHIRIN, J. KACZMAREK), der sogenannte Festigkeitsverschleiß, und zwar der Stand- oder Ermüdungsverschleiß entstanden [3], [4], [5].

Kennzeichen eines derartigen Ermüdungsverschleißes sind Ausschartungen, Ausbröckelungen, Ausbrüche und Risse an der Schneide.

Als Ausschartung werden die Schneidenwerkstoffverluste infolge Überschreitung der örtlichen Festigkeit in der unmittelbaren Berührungzone der Schneide mit dem zu bearbeitenden Werkstoff bezeichnet. Im allgemeinen sind dies kleine Beschädigungen der Schneidkante, von Zehntelmillimetern, Größenordnung, die weder den Verlauf der Abriebverschleißkurve der Schneidkante, noch die Güte der bearbeiteten Oberflächen oder den Anstieg der effektiven Schnittleistung in sichtbarer Weise beeinflussen (Abb. 2).

Als Ausbröckelung werden größere Schneidenwerkstoffverluste bezeichnet, welche durch Überschreitung der Festigkeit auch im Bereich außerhalb des unmittelbaren Kontaktes der Schneide mit dem Span und dem bearbeiteten Werkstoff verursacht werden (Abb. 3 und 4).

Die Ausbröckelungen werden immer von einer Verschlechterung der bearbeiteten Oberfläche und dem Anstieg der Schnittleistung begleitet.

Unter Ausbrüchen sind große Schneidenwerkstoffverluste zu verstehen, welche die Form der Schneide verändern (Abb. 5).

Unter Riß wird eine an den Schneidenoberflächen ohne Materialverlust sichtbare Störung der interkristallinen Bindung gemeint (Abb. 6).

Die vom Verfasser durchgeführten Untersuchungen beweisen, daß zwischen dem Festigkeitsverschleiß und dem mechanischen Abrieb keine deutliche

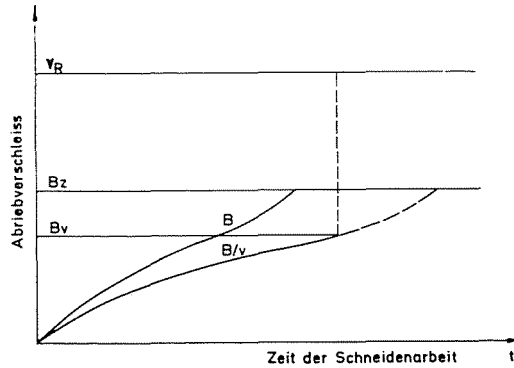


Abb. 1. Die Verschleißkurven der Spanungswerkzeuge (B — typische Kurve des Abriebverschleißes, B/V — eine der Formen des Abrieb- und Festigkeitsverschleißes, B_z — zulässiger Abrieb auf der Freifläche, V_R — maximale Ausbröckelung, gemessen von der Seite der Freifläche)

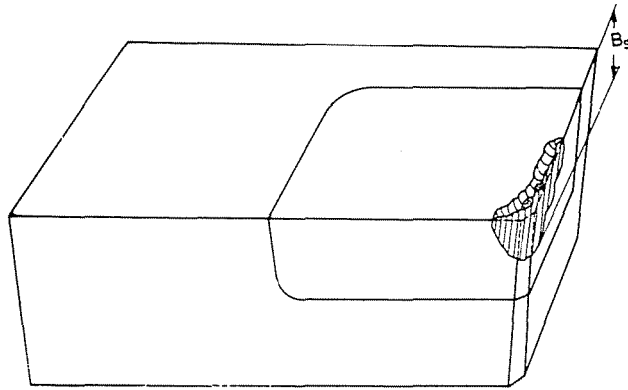


Abb. 2. Beispiel der Schneidenauschartung; B_z — die Größe des Abriebverschleißes, bei der die Ausschartung eintritt

Grenze besteht. Während der Zerspanung tritt an der Schneidkante ein leicht meßbarer Abrieb auf, der z. B. mit B bezeichnet wird, und gleichzeitig erscheinen die ersten kleinen Ausschartungen oder Ausbröckelungen. Sodann kann einem gewissen Moment eine heftige Zerstörung der Bindung der Schneidkante in Form von größeren Ausbröckelungen, die mit V_a (Abb. 1 — Kurve B/V) bezeichnet werden sollen und den Wert B_z beträchtlich überschreiten, oder in Form des Ausbruchs eintreten, wodurch eine weitere Benutzung der Werkzeugkante unmöglich wird.

Die Ergebnisse der Untersuchungen über den Verschleiß der Hartmetallschneiden [1], [2], [4] berechtigen zur Feststellung, daß der Festigkeitsverschleiß der Werkzeugschneiden im Zerspanungsvorgang den Charakter eines stochastischen Ereignisses im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung hat. Das grundlegende Merkmal des stochastischen Ereignisses ist dem Umstand, ob es

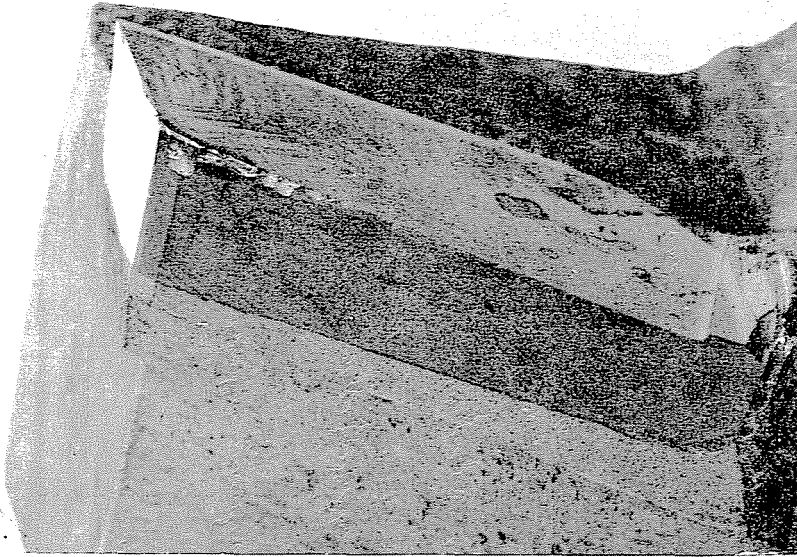


Abb. 3. Ausbröckelung der Schneidkante eines Drehmeißels

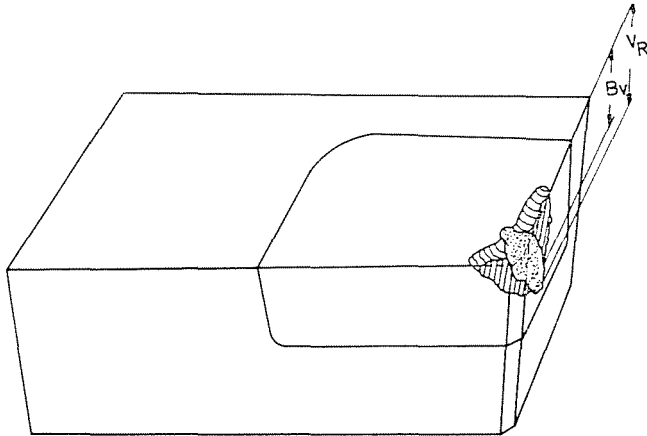


Abb. 4. Beispiele für die Ausbröckelungen der Meißelschneide; B_v — die Größe des Abriebverschleißes, bei welcher eine Schneidenausbröckelung der Größe V_R erfolgte

unter anderen Bedingungen vorkommen kann oder nicht. Dieses Merkmal entspricht dem Ereignis beim Festigkeitsverschleiß der Werkzeuge.

Dieses Merkmal wird begründet durch:

— die Unhomogenität der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Hartmetallen;

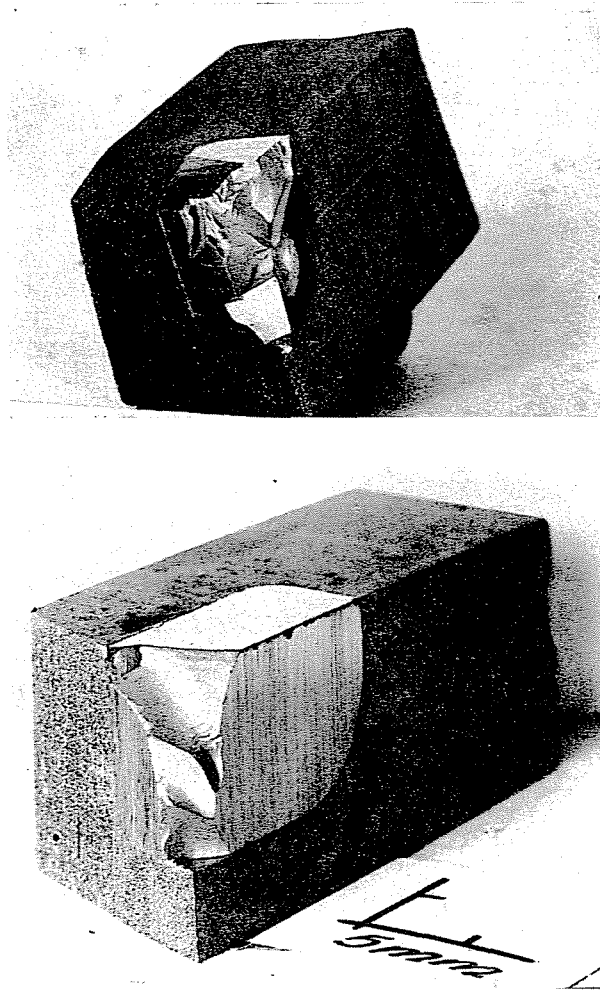


Abb. 5. Ausbrüche an den Schneidkanten des Drehmeißels

— die nicht stabilisierten und nicht vollkommen kontrollierten Herstellungs- und Regenerationsbedingungen der Hartmetallwerkzeuge, insbesondere den unkontrollierten Spannungszustand in der Oberflächenschicht;

— den dynamischen Charakter der Werkzeugbeanspruchung bei einigen Prozessen des Einsatzes, wo die Bedingungen des Verschleißes infolge Überschreitung der Dauer- oder Standfestigkeit gegeben sind.

Weitere Begründung für den stochastischen Charakter des Festigkeitsverschleißes von Hartmetallwerkzeugen liefern die Untersuchungen von H. OPITZ [12], [13], N. ZORIEW [17] sowie vom Verfasser, die bewiesen, daß die Abweichung der Festigkeitsstandzeiten mit der Veränderlichkeit der zu

messenden Veränderlichen vergleichbar ist, sowie daß die Verschleißformen in hohem Grade von den Spanungsbedingungen und von der Schneidengeometrie abhängen.

Anzeichen des Festigkeitsverschleißes können noch vor Erreichung des zulässigen Verschleißkriteriums B_z auftreten, vor allem bei höheren Werten der die Spanungsbedingungen bildenden Parameter und der Schneidengeometrie (Abb. 7, 8, 8, 9, 10, 11). Aus den Diagrammen ergibt sich, daß die als

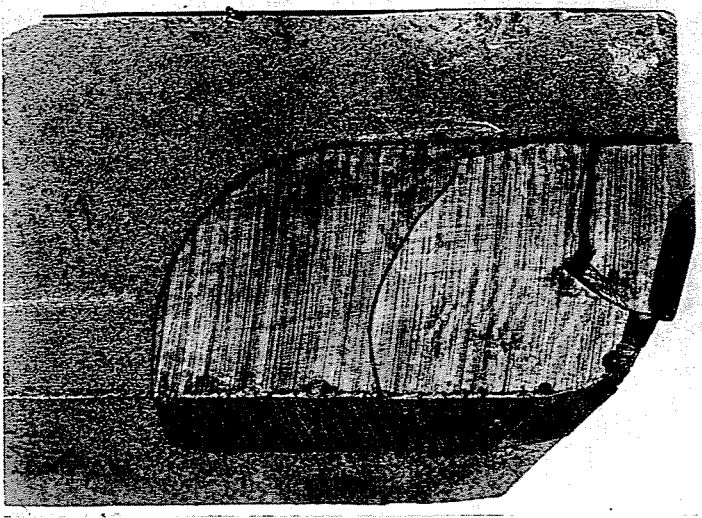


Abb. 6. Riß an der Platte der Hartmetallschneide

optimal geltenden Zerspanungsbedingungen, welche nur den mechanischen Abrieb der Schneiden betreffen, im Bereich der mittleren oder niedrigen Schnittparameterwerte liegen. Zum Beispiel liegt der »optimale«, das heißt der keinen Festigkeitsverschleiß verursachende Bereich der Vorschübe pro Schneide (Abb. 11) beim Fräsen mit Fräsköpfen innerhalb der Grenzen $S_z = 0,07 - 0,1$ mm pro Schneide, wobei größere Vorschübe, z. B. in der Größenordnung von 0,2 mm pro Schneide, Ausbröckelungen der Schneiden fast in der mit Rücksicht auf den Abriebverschleiß festgelegten halben Standzeit herbeiführen. Die genannte Empfehlung ist dadurch begründet, daß der Festigkeitsverschleiß bedeutende Störungen im Bearbeitungsprozeß und die Beschädigung des zu bearbeiteten Werkstückes bzw. ein erschwertes Nachschleifen des Werkzeuges verursachen kann.

Gegen diese Art der Ausschaltung des Festigkeitsverschleißes, und zwar durch die Senkung der Zerspanungsleistung, werden jedoch bedeutende Ein-

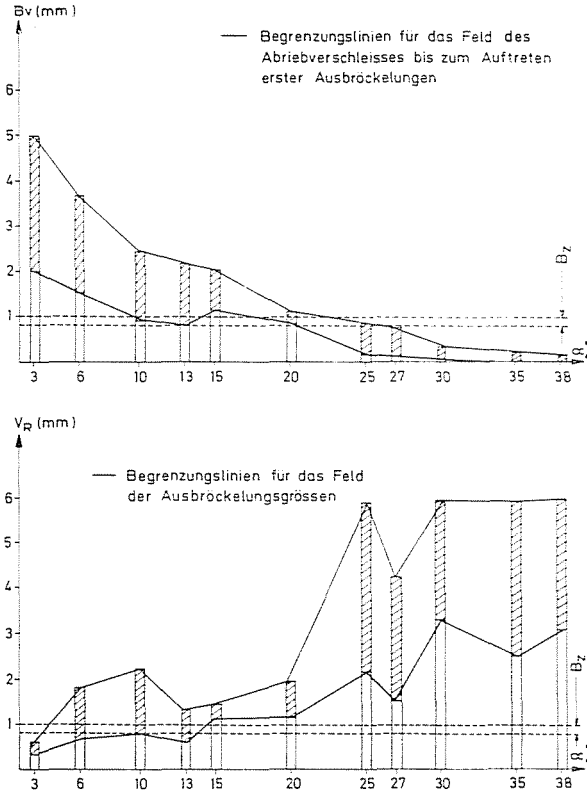


Abb. 7. Einfluß des Freiwinkels α_0 auf die Größe des Abriebverschleißes B_v bis zum Eintreten der ersten Ausbröckelungen der Größe V_R , bei der Bearbeitung mit Fräsköpfen, nach Untersuchungen des Verfassers [1]

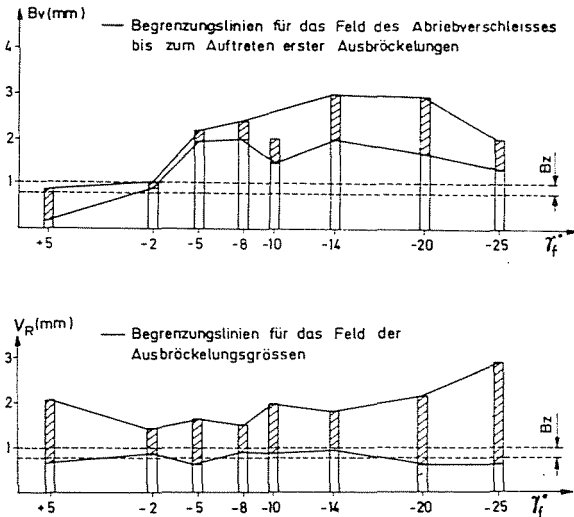


Abb. 8. Einfluß des Spanwinkels γ_f auf die Größe des Abriebverschleißes bis zum Eintreten der ersten Ausbröckelungen bei der Bearbeitung mit Fräsköpfen [1]

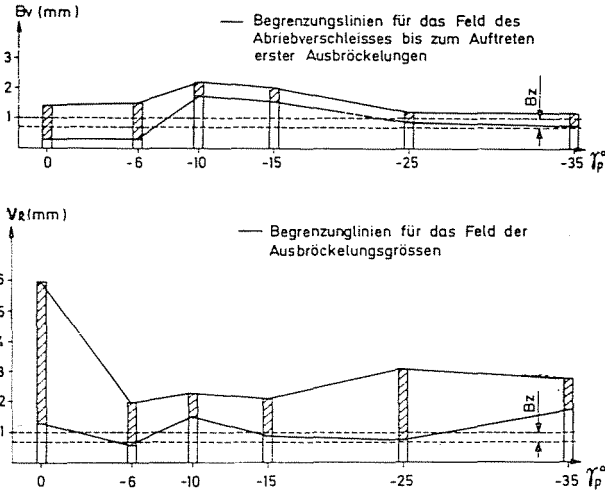


Abb. 9. Einfluß des Spanwinkels γ_p auf die Größe des Abriebverschleißes bis zum Eintreten der ersten Ausbröckelungen bei der Bearbeitung mit Fräsköpfen [1]

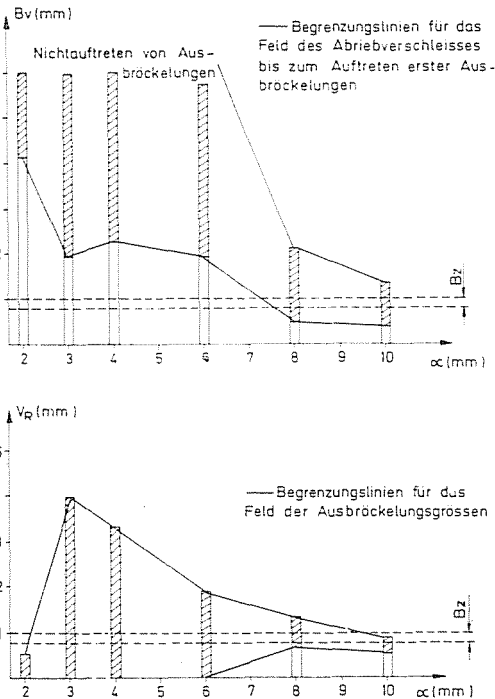


Abb. 10. Einfluß der Schnitttiefe auf die Größe des Abriebverschleißes bis zum Eintreten der ersten Ausbröckelungen bei der Bearbeitung mit Fräsköpfen [1]

wände erhoben. Es ist deshalb zweckmäßig, die Modifizierungsvorschläge der bisherigen Optimierungsmethoden nur für dem Abriebverschleiß angepaßte Zerspanungsbedingungen darzulegen, und zwar unter Berücksichtigung der Rolle und der Bedeutung der Zuverlässigkeit des Werkzeugs [9], [14], [15].

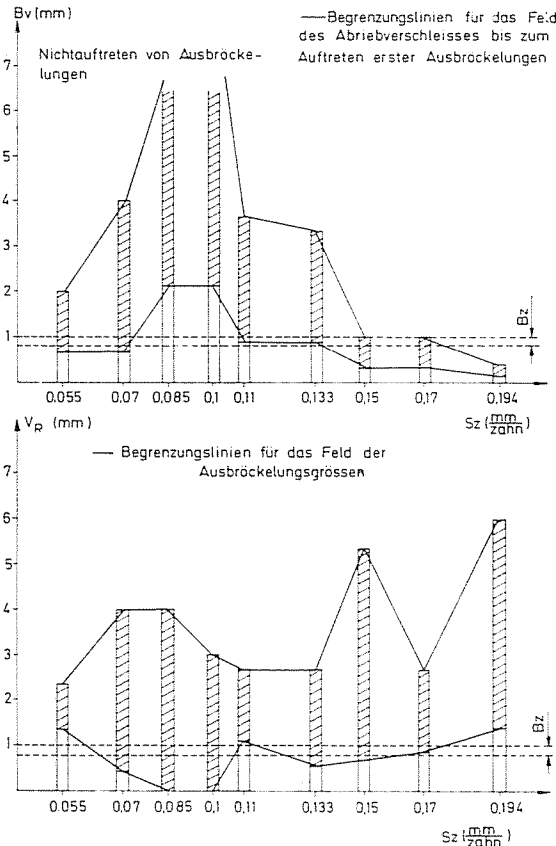


Abb. 11. Einfluß des Vorschubs auf die Größe des Abriebverschleißes bis zum Eintreten der ersten Ausbröckelungen bei der Bearbeitung mit Fräsköpfen [1]

Die Grundlage der vorgeschlagenen Optimierung ist die Feststellung, daß der unvermeidliche Festigkeitsverschleiß der Werkzeuge berücksichtigt werden soll. Die optimalen Zerspanungsbedingungen sollen so bestimmt werden, daß der Festigkeitsverschleiß entweder ausgeschlossen oder so zugelassen wird, daß das angesetzte Optimierungskriterium, als welches meistens die Bearbeitungskosten dienen, den Minimalwert erreicht, jedoch bei voller Einhaltung der sog. Optimierungsbedingungen, d. h. der Anforderungen an die Qualität des Erzeugnisses.

Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit der Werkzeuge

Der Festigkeitsverschleiß der Werkzeuge kann — von den Bearbeitungsmethoden und den Ausführungsbedingungen unabhängig — als stochastisches Ereignis betrachtet werden, was zu folgenden Schlüssen berechtigt:

1. Während der Arbeitszeit t des Werkzeuges können zwei alternative Zustände angenommen werden:

— Zustand B , in dem kein Festigkeitsverschleiß V des Werkzeuges erfolgt;

— Zustand \bar{B} , in dem das stochastische Ereignis V des Festigkeitsverschleißes des Werkzeuges vorkommt.

2. In der vereinfachenden Annahme, daß sich während der Zerspanung die Bedingungen nicht ändern, darf angenommen werden, daß während der Bearbeitungszeit t eine Änderung in der Zusammensetzung gewisser physikalisch-technischer Bedingungen des Werkzeuges in Zustand B erfolgt, die allgemein als Verschleiß bezeichnet wird und dazu führt, daß nach einer Zeit $t = T$ der Übergang zum Zustand \bar{B} stattfindet.

Die Zeit T wird üblicherweise als Schneidenstandzeit bezeichnet.

3. Im Werkzeugverschleißprozeß können unterschieden werden

— offener (meßbarer) Verschleiß B , gekennzeichnet durch die Möglichkeit der Beobachtung oder Messung desselben im Laufe des Bearbeitungsvorgangs; dies kann z. B. der mechanische Abrieb sein, welcher eine Änderung der Werkzeugschneideform verursacht; die Größe dieses Verschleißes wird meistens durch die Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche V_B ausgedrückt;

— verhüllter (nicht meßbarer) Verschleiß, der zwar gleich vom Beginn der Arbeit der Schneiden, zum Beispiel in Form von Werkstoffermüdung, innerer Mikrorisse u. a. stattfindet, jedoch nicht zu beobachten und zu messen ist, bevor der Festigkeitsverschleiß eintritt.

Der verhüllte Verschleiß tritt in einem unbestimmten Zeitpunkt ein, daher ist das Ereignis V stochastisch und kann unter Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung untersucht werden.

Beim offenen Verschleiß wird das Werkzeugverschleißkriterium noch vor dem Festigkeitsverschleiß erreicht und man kann sich des determinierten Begriffes der Schneidenstandzeit, die mit T_e bezeichnet wird, bedienen.

Beim verhüllten Verschleiß kann dagegen der Festigkeitsverschleiß noch vor dem Ablauf der Schneidenstandzeit T_e eintreten, wobei die Schneidenstandzeit T die Zufallsvariable ist. Bei der Optimierung der Bearbeitungsbedingungen soll nicht der bestimmte Begriff T_e , sondern die erwartete Schneidenstandzeit \bar{T} oder $E(T)$ berücksichtigt werden. Es können zwei Arten der erwarteten Schneidenstandzeit vorkommen:

— in der Annahme, daß die Standzeit T die kontinuierliche stochastische

Variable im Zeitintervall $t: (0, T_e)$ mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ ist —

$$\bar{T} = E(T) = \int_0^{T_e} t \cdot f(t) dt \quad (1)$$

— die diskrete erwartete Schneidenstandzeit, die für konkrete Bearbeitungsbedingungen auf Grund der quantitativen Beurteilung von diskreten Werten der Standzeit (T_k) und ihrer Wahrscheinlichkeit (p_k) bestimmt wird

$$\bar{T} = E(T) = \sum_{k=0}^n T_k p_k \quad (2)$$

Für praktische Zwecke ist es bequemer, sich der Zuverlässigkeitsfunktion $R(0, T)$ zu bedienen, welche die Wahrscheinlichkeit der im Zustand B einwandfreien Arbeit der Werkzeugschneide im Bereich $(0, T)$ bestimmt:

$$R(0, T) = P\{S_t = S; 0 \leq t \leq T\} \quad (3)$$

wo S_t = Zustand des Werkzeuges in der Zeit t .

In der Annahme, daß der Zerspanungsvorgang mit einem neuen Werkzeug beginnen wird, also

$$R(0) = 1 \quad \text{und} \quad S_0 = S$$

gelten:

$$R(T) = P\{S_t = S; 0 \leq t \leq T\} | S_0 = S \quad (4)$$

bzw.

$$R(T) = 1 - \{W(0, T)\} \quad (5)$$

Die Werkzeugszuverlässigkeit kann auch gekennzeichnet werden, indem man den Begriff der Intensität der Beschädigungen λ einführt. Diese gibt das Verhältnis der Anzahl der in einzelnen Zeiteinheiten abgenutzten Werkzeuge zur Anzahl der Werkzeuge an, welche bis zu diesem Zeitpunkt durch Abstumpfung (Verschleiß) unbrauchbar wurden. Dieser funktionelle Zusammenhang kann in der Form dargestellt werden:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - P\{W/t, t + \Delta t\}}{\Delta t} \quad (6)$$

wo Δt ein beliebiger Zeitzuwachs ist.

Die Formel (6) kann in die Formel nach Wiener umgewandelt werden, welche für $\lambda = \text{konst.}$ die Form des sogenannten exponentiellen Zuverlässigkeitsgesetzes annimmt:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Obige Gleichung liefert die Grundlage zur Bestimmung des Begriffes der zu erwartenden Schneidenstandzeit \bar{T} in der zur praktischen Benutzung geeigneten Weise

$$\bar{T} = \int_0^{T_c} R(t) dt \tag{8}$$

bzw.

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \exp(-\lambda T_c) \right] = \frac{1}{\lambda} \left[1 - R(T_c) \right] \tag{8a}$$

Damit der Begriff der erwarteten Schneidenstandzeit \bar{T} sowie die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ praktische Bedeutung haben, sollen sie in Form von empirischen Formeln in Anlehnung an statistisch-empirische Untersuchungen erfaßt werden. Die in den obigen Formeln vorkommende Intensität der Beschädigungen soll das Merkmal des gegebenen Werkzeugtyps, der Bearbeitungsmethode und ihrer Bedingungen sein. Sie soll empirisch bestimmt und standardisiert werden, wie die Parameter des Abriebverschleißes von Werkzeugschneiden in der Zerspanung. Es wurde zum Beispiel festgestellt, daß von der Stückzahl $N = 150$ der für die Spannung innerhalb der festgelegten Schneidenstandzeit $t = T = 90$ min verwendeten Werkzeuge $U = 30$ Werkzeuge durch festigkeitsbedingte Ausbröckelung und die übrigen durch Abriebverschleiß beschädigt wurden. Die Intensität der Beschädigungen ist nach der Gleichung (7) für $t = T_c$

$$R(T_c) = e^{-\lambda T_c} = 1 - \frac{U}{N}$$

oder

$$R(90) = e^{-\lambda 90} = 1 - \frac{30}{150} = 0,8 .$$

Die Werte der Exponentialfunktion e^{-x} (wo $x = \lambda t$) sind in allgemein zugänglichen Tabellen enthalten, werden bzw. besonders erarbeitet [17].

Den Tabellen entnehmen wir für $e^{-x} = 0,8$ den Wert $x = \lambda 90 = 0,223$, wonach

$$\lambda = \frac{0,223}{90} = 2,48 \cdot 10^{-3} \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$$

Die erwartete Schneidenstandzeit ergibt sich nach der Formel (8) zu:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \left[1 - R(T_c) \right] = \frac{1}{2,48 \cdot 10^{-3}} \left[1 - 0,8 \right] = 80,6 \text{ min} .$$

Die Einführung des Begriffes der Zuverlässigkeit für die Beurteilung der Werkzeuge unter den obigen Annahmen wird in der Praxis auf die Kenntnis der Zahl der Werkzeuge zurückgeführt, die von einer gewissen Menge N bei der Bearbeitung in der Zeit T_c schadhft wurden.

Auf diesem Gebiet sind die Arbeiten von Z. POLANSKI [14], [15] zu unterstreichen, der auf Grund des Umstandes, daß die Abrieb- und Festigkeitsverschleißprozesse der Werkzeuge parallel verlaufen (ähnlich wie bei anderen mechanischen Konstruktionen), die Einführung der Kennkurven $B-R$ (Abb. 12) vorschlägt.

Diese Kennlinie erfaßt in komplexer Weise das Kriterium des offenen Verschleißes, zum Beispiel des Abriebverschleißes (B), sowie die Beurteilung des verhüllten Verschleißes mit Hilfe der Zuverlässigkeit (R), in Abhängigkeit von der Bearbeitungszeit t .

Der obere Teil des Diagramms stellt die bekannte [6], [7], [8] Verschleißkurve dar, wobei B ein beliebiges Verschleißkriterium bedeutet. Der untere Teil des Diagramms beschreibt die Zuverlässigkeitsfunktion des Werkzeuges, die z. B. nach dem exponentiellen Zuverlässigkeitsgesetz bestimmt wird, wodurch aber ein anderartiger Verlauf derselben nicht ausgeschlossen wird [9], [10], [14], [15].

Mit Hilfe der angeführten Kennkurve $B-R$ können die Fälle des Werkzeugverschleißes gut veranschaulicht werden:

1. Abriebverschleiß (B): ist durch Fehlen des Festigkeitsverschleißes (Abb. 13a) gekennzeichnet, alle Schneiden verschleiben ausschließlich infolge Erreichung des zulässigen Abriebs B_z in der Zeit T_e ; dies bedeutet, daß

$$R(T_e) = 1 - \frac{U}{N} = 1$$

oder

$$R(T_e) = 100\% \quad \text{und} \quad \lambda = 0, \quad \text{sowie} \quad T = T_e$$

ist.

Der Abriebverschleiß B stellt die klassische Form des Verschleißes von Spannungswerkzeugen insbesondere aus Werkzeugstählen dar, welche in bisherigen grundlegenden Arbeiten über die spanabhebende Bearbeitung analysiert wurde [6], [7], [8].

2. Festigkeitsverschleiß (V): ist der ausdrückliche Gegensatz des Abriebverschleißes; fast alle Werkzeuge unterliegen dem Festigkeitsverschleiß (Abb. 13b) noch vor Erreichung des zulässigen Abriebs B_z , was folgendermaßen aufgefaßt werden kann

$$R(T_e) \approx 0$$

weil

$$U + \Delta N = N$$

Der Wert ΔN bedeutet eine gewisse geringe Anzahl von Werkzeugen, die dem Festigkeitsverschleiß nicht unterlagen. $N = \text{circa } 0\%$.

Dieser Fall ist abnormal und ergibt sich aus der irrtümlichen Wahl der Bearbeitungsbedingungen.

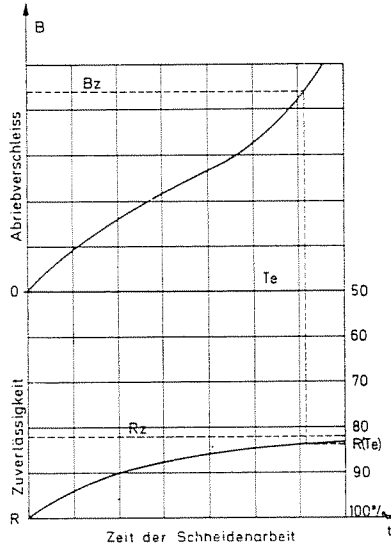


Abb. 12. Die Kennlinie B - R , die den Abriebverschleiß B und die Zuverlässigkeit R der Werkzeuge in Abhängigkeit von der Bearbeitungszeit t angibt [14], [15]

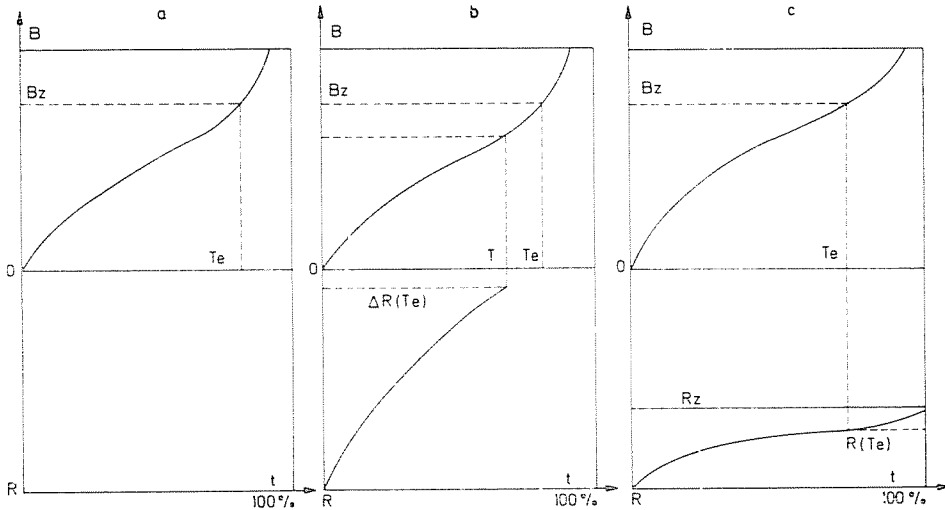


Abb. 13. Arten des Schneidverschleißes von Werkzeugen, dargestellt mit Hilfe der Kennlinie B - R . a) Abriebverschleiß B ; b) Festigkeitsverschleiß V ; c) Abrieb- und Festigkeitsverschleiß B/V

3. Der Abrieb-Festigkeitsverschleiß (B/V) ist eine häufige Form des Verschleißes von Werkzeugschneiden, insbesondere aus Hartmetallen (Abb. 13c). Er wurde vorher eingehend behandelt und die angeführten Formeln, die den Begriff der Zuverlässigkeit berücksichtigen, können für die Optimierung der Bearbeitungsbedingungen benutzt werden.

Schlußfolgerungen

Die Anwendung im Zerspanungsprozeß spröder Werkzeugstoffe, insbesondere der Hartmetalle, erfordert eine Änderung bisheriger traditioneller Begriffe und Bezeichnungen des Verschleißes von Werkzeugschneiden sowie der Methoden der Optimierung des Bearbeitungsprozesses.

Derartige Werkzeuge unterliegen nicht nur dem Abriebverschleiß, sondern auch — wie es in empirischen Versuchen und in der Betriebspraxis festgestellt wurde — in einem hohen Prozentsatz dem Festigkeitsverschleiß (Ausschaltungen, Ausbröckelungen, Risse u. ä. m.). Die grundlegende Änderung der physikalischen Formen des Werkzeugverschleißes zieht bestimmte technisch-ökonomische Folgen nach sich.

In der Arbeit wird die Einführung des probabilistischen Begriffes der erwarteten Schneidenstandzeit \bar{T} , anstelle der bisher benutzten bestimmten »Schneidenstandzeit«, sowie die Einführung des zusätzlichen Begriffes der Zuverlässigkeit R der Werkzeugschneide vorgeschlagen.

Zusammenfassung

Die Verwendung von Hartmetallen bei der Herstellung von Schneidwerkzeugen sowie das Auftreten unterschiedlicher physikalischer Formen des Schneidenverschleißes machen eine Änderung bei der Festlegung der Werkzeugverschleißkriterien und der Schneidenstandzeiten erforderlich.

In der Arbeit wurden die Beurteilung des Festigkeitsverschleißes von Werkzeugschneiden und die Klassifizierung von Verschleißkennzeichen dargelegt. Da der Festigkeitsverschleiß die Eigenschaften eines stochastischen Ereignisses hat, wird die Einführung des probabilistischen Begriffes der erwarteten Schneidenstandzeit \bar{T} und des zusätzlichen Begriffes der Zuverlässigkeit der Werkzeugschneide R vorgeschlagen.

Dr. Dipl. Ing. Jan HARASYMOWICZ, Technische Universität Krakkau, Polen.