

УДК 621.9

Д. Г. Шатуров

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТВЁРДОСПЛАВНОГО ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СРЕДНИХ СКОРОСТЯХ РЕЗАНИЯ

UDC 621.9

D. G. Shaturov

RESEARCH INTO CUTTING ABILITY OF CEMENTED CARBIDE EDGE TOOLS AT MEDIUM CUTTING SPEEDS

Аннотация

Предложена методика и получены формулы для определения стойкости твёрдосплавного лезвийного инструмента в зависимости от режимов обработки, температуры и вида износа. Установлен диапазон скоростей резания наименьшей стойкости инструмента, обработку в котором желательнее производить резцом с регулярным микрорельефом на его передней поверхности.

Ключевые слова:

обработка, резец, стойкость, скорость резания, износ, микрорельеф.

Abstract

A technique and formulas are proposed for determining the durability a cemented carbide edge tool depending on processing conditions, temperature and type of wear. A range of cutting speeds with the shortest tool life has been established, in which it is desirable to perform machining using a cutter with a regular microrelief on its front surface.

Keywords:

machining, tool, durability, cutting speed, wear, microrelief.

При обработке углеродистых и конструкционных сталей зависимость периода стойкости от скорости резания изменяется плавно по кривой с наличием впадины, расположенной между двумя экстремальными значениями периода стойкости, точками $A_1 (V_{01}, T_{01}^{\max})$ и $A_0 (V_0, T_0^{\max})$, так называемыми «горбами», находящимися на разных уровнях по стойкости при разных скоростях резания (рис. 1) [1].

Отсутствие исследований по определению стойкости инструмента в диапазоне скоростей резания впадины, от скорости резания V_{01} до скорости резания V_0 , не даёт возможность обоснованно назначать рациональные режимы обработки для этого участка кривой. В то

же самое время скорости резания данного диапазона скоростей от V_{01} до V_0 востребованы промышленностью и широко используются при черновой и полустойковой обработке: при точении, сверлении, зенкеровании, фрезеровании и т. д. Задача настоящих исследований – восполнить этот пробел, применяя многочисленные результаты известных исследований [2–6, 8–11].

С левой стороны впадина ограничена правой ветвью кривой зависимости $T_{01} = f(V)$, принадлежащей зоне наростообразования, от скорости V_{01} до V_m , где V_m – скорость резания, соответствующая минимальной стойкости инструмента впадины [1].



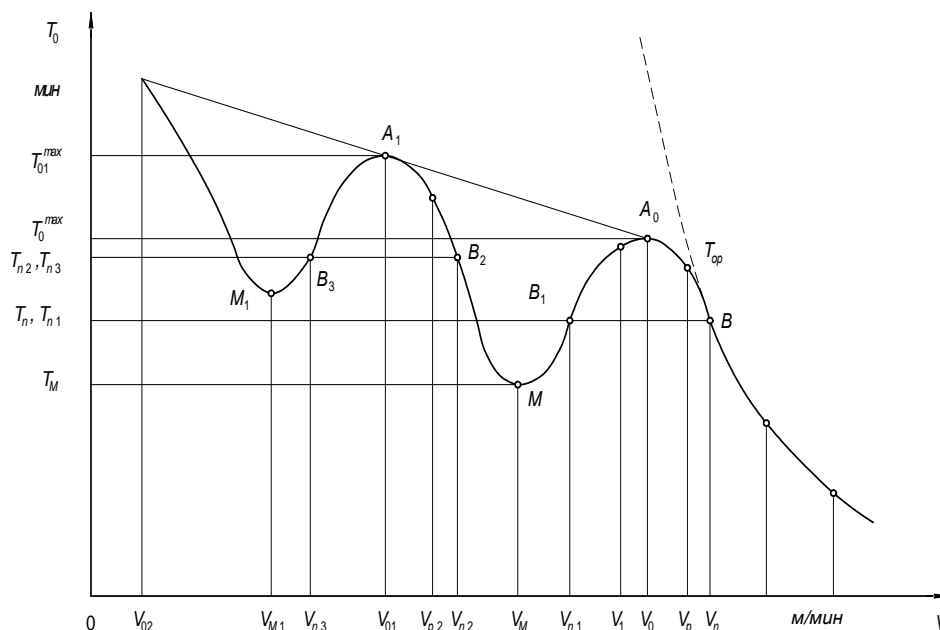


Рис. 1. Зависимость периода стойкости лезвийного инструмента от скорости резания

С правой стороны впадина ограничена левой ветвью кривой $T_0 = f(V)$ периода стойкости от скорости резания, от скорости V_M до V_0 , соответствующей максимальному периоду стойкости второго, правого «горба» [1].

В зоне скоростей наростообразования изменение величины подачи S и глубины t не влечёт за собой заметного изменения величины скорости резания V_{01} , где имеет место максимальный период стойкости и температура резания равна $300\text{ }^\circ\text{C}$ [5, с. 160; 15].

Поскольку экспериментальная кривая $T_{01} = f(V)$ изменения периода стойкости от скорости резания в зоне наростообразования в верхней своей части имеет куполообразную форму, а в нижней – формы линий с выпуклостью вниз, разделённые от верхней части точками перегиба, расположенными по разные стороны от скорости резания V_{01} и от максимального значения периода стойкости T_{01}^{\max} , и образована справа и слева от скорости V_{01} одним и тем же видом абразивно-адгезионного износа, то она может быть представлена в виде кривой нормального

распределения [1].

$$T_{01} = \frac{T_{n2} \cdot \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}}, \quad (1)$$

где T_{01} – период стойкости инструмента при низких и средних скоростях резания, мин; V_{01} – скорость резания, соответствующая максимальному периоду стойкости, м/мин; V_{n2} , T_{n2} – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, инструмента в точке B_2 перегиба кривой $T_{01} = f(V)$; V – текущая скорость резания, м/мин (см. рис. 1).

Подставив в (1) $V = V_{01}$, получим

$$T_{01}^{\max} = T_{n2} \sqrt{e}, \quad (2)$$

где T_{01}^{\max} – максимальный период стойкости реза, мин.

Для точек B и B_2 перегиба кривых $T_0 = f(V)$ и $T_{01} = f(V)$, где показатель интенсивности износа $n_0 = 1$ [7, 12], можно записать

$$T_n \cdot V_n \cdot U_0 = T_{n2} \cdot V_{n2} \cdot U_{02} = 1000\delta_0 \cdot K_p, \quad (3)$$

где U_0, U_{02} – величины относительного размерного износа лезвия резца в зоне наростообразования и вне ее соответственно, мкм/км.

Величина скорости резания V_{01} для каждого материала детали определяется экспериментально по минимальному коэффициенту усадки стружки при изменении скорости резания от 20 до 50 м/мин. Максимальная стойкость T_{01}^{\max} определяется из четырех-пяти опытов по величине износа задней поверхности от времени резания при определенной скорости V_{01} из расчёта или графического построения износа в логарифмической системе координат по заданной величине оптимального износа.

Обозначим величину смещения скорости резания V_{n2} от скорости V_{01} центра симметрии зависимости $T_{01} = f(V)$ через коэффициент α .

$$V_{01} = \alpha \cdot V_{n2}. \quad (4)$$

Тогда выражение (1) после подстановки (4) будет иметь вид:

$$T_{01} = T_{n2} \cdot e^{\frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^2 \left(\frac{V}{V_{01}} - 1 \right)^2 \right]}. \quad (5)$$

Положительной стороной зоны наростообразования является то, что по отношению к инструменту нарост выполняет защитные функции, препятствуя контакту стружки с передней поверхностью резца и задней его поверхности с поверхностью резания, и тем самым уменьшает изнашивание его рабочих поверхностей [6, с. 112]. Однако при повышении скорости резания $V > V_{n2}$ абразивно-адгезионный износ интенсифицируется и стойкость резца резко уменьшается.

Износ резца протекает с циклическим схватыванием (соединением) ма-

териалов стружки и инструмента и периодическим отрывом за счёт срезающих касательных напряжений и удалением сходящей стружкой и поверхностью резания разупрочнённых частиц кобальта и карбидов твёрдого сплава инструмента [6, с. 108]. На передней поверхности резца образуются адгезионные пятна (углубления) с увеличивающимся во времени их числом, площадью и расположением. Поверхность режущего инструмента имеет ячеистый вид [15, с. 162]. С повышением скорости резания от V_{n2} до V_m увеличивается температура в зоне резания и прочность адгезионных связей уменьшается. Вначале нарост вырождается в тонкий несплошной слой, параллельный передней поверхности резца, а затем при скорости резания, равной V_m , и температуре резания, равной 600 °С, исчезает вовсе [6, с. 109]. В точке M при скорости резания V_m имеем наименьшую стойкость инструмента.

Отсюда можно сделать вывод, что при обработке в зоне скоростей резания от V_{n2} до V_m необходимо предусмотреть такие технологические и конструктивные мероприятия, которые бы способствовали увеличению сцепления нароста с передней поверхностью инструмента и удерживанию его на ней, что повлекло бы за собой уменьшение износа резца и повышение его стойкости. Одним из мероприятий является создание на передней поверхности инструмента специального микрорельефа в виде отдельных углублений (ямки) или канавок, расположенных под некоторым углом по отношению к главному лезвию. В процессе резания углубления микрорельефа будут частично или полностью заполнены обрабатываемым материалом или наростом, что увеличит его сцепление с передней поверхностью инструмента.

Защитные функции нароста возрастут, что приведёт к повышению стойкости инструмента при $V > V_{n2}$.

Переломный момент в изнашива-



нии инструмента наступает при повышении скорости резания $V > V_m$ и температуры в зоне резания более $600\text{ }^\circ\text{C}$ [6, 15] (см. рис. 1).

Тогда абразивно-адгезионный износ постепенно уступает место абразивно-окислительному, где окисление, т. е. восстановление под действием кислорода воздуха окисной плёнки, является преобладающим [9, с. 162]. В этом случае износ резца уменьшается, а его стойкость увеличивается. Скорость образования окисных плёнок толщиной $10...30\text{ \AA}$ составляет сотые и тысячные доли секунды, а их микротвёрдость в несколько раз превышает такую основного металла [17, с. 26]. Окисные плёнки препятствуют адгезии и предохраняют трущиеся поверхности от непосредственного контакта и тем самым уменьшают их износ. Если при скорости резания $V > V_m$ обработка будет осуществляться резцом с микрорельефом на передней поверхности, то будем иметь увеличение износа и уменьшение стойкости инструмента. Это произойдёт потому, что нарост, помещённый в углубления микрорельефа,

при температуре более $600\text{ }^\circ\text{C}$ будет частично или полностью срываться и уноситься стружкой вместе с разрушенной при этом окисной плёнкой. Износ резца из фазы абразивно-окислительного перейдёт в фазу абразивно-адгезионного, что уменьшит стойкость инструмента, чего допускать нельзя.

С другой стороны, повышение стойкости твёрдосплавного инструмента с увеличением скорости резания $V > V_m$ происходит вследствие роста температуры в зоне резания и в связи с этим благоприятного изменения отношений H_1/H_2 контактных твёрдостей инструмента H_1 и обрабатываемого материала H_2 [10, с. 181]. Повышение температуры резания более $600\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к сильному размягчению обрабатываемого материала и к незначительному размягчению материала инструмента. В результате уменьшается вероятность отрыва частиц инструмента и его износа, а величина которого зависит от физико-механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов и температуры (рис. 2).

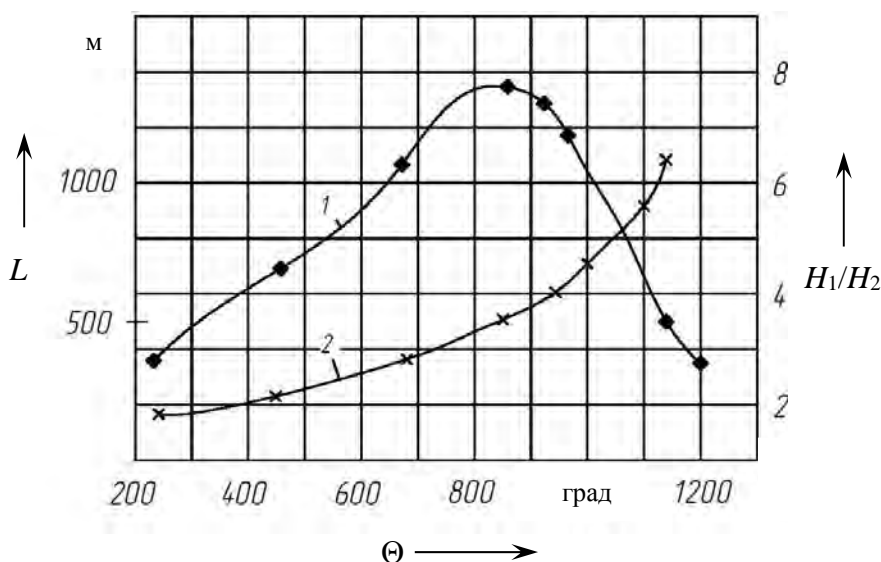


Рис. 2. Изменение пути резания L (1) до затупления резца и отношения твёрдостей H_1/H_2 от температуры [10]



Зависимость износа реза от отношения контактных твёрдостей можно выразить как [10, с. 177; 17, с. 171]

$$L = VT_0 = \text{const} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^z, \quad (6)$$

где L – путь резания; V – скорость резания; T_0 – период стойкости инструмента [12]; H_1, H_2 – твёрдости инструментального материала и контактных слоёв стружки; z – показатель степени, характеризующий интенсивность износа, $z = 1,5 \dots 2,0$ [14, с. 107; 18, с. 173].

Так, при обработке стали 40 резцом T15K6 при температуре 200 °С имеем отношение твёрдостей $H_1/H_2 = 3,85$, а при температуре 900 °С это отношение $H_1/H_2 = 6,1$ [10, с. 150], т. е. имеем увеличение отношения твёрдостей в 1,6 раза. При изменении в несколько раз отношения контактных твёрдостей

интенсивность износа изменяется в разы, в приведенном примере она уменьшилась в 2,5 раза (см. рис. 2) [17, с. 173].

Таким образом, чем больше твёрдость инструмента, чем меньше твёрдость обрабатываемого материала, тем больше пройденный путь реза до затупления. Отношение твёрдостей является некоторым показателем износостойкости рабочих поверхностей инструмента.

Дальнейшее повышение скорости резания при $V > V_{n1}$, где V_{n1} – скорость резания в точке перегиба B_1 кривой $T_0 = f(V)$ (см. рис. 1), и температуры в зоне резания выше линии AC_1 (температура $\Theta = 727$ °С) до AC_3 (рис. 3) в тонком прирезцовом слое стружки на расстоянии 5...10 мкм от передней поверхности вызывает аллотропические фазовые и структурные превращения α -Fe в γ -Fe.

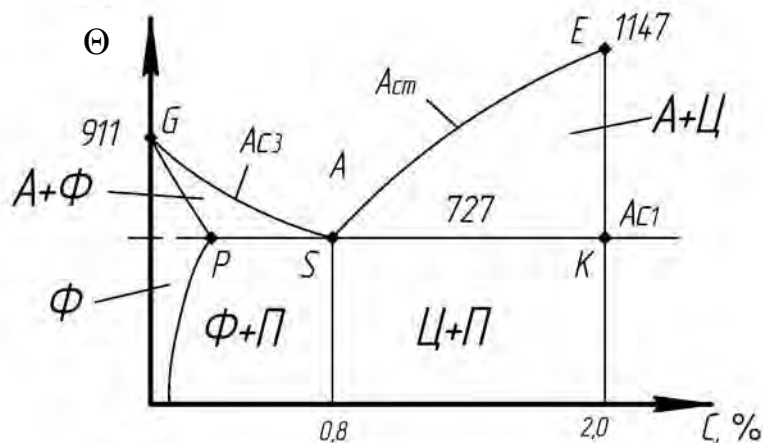


Рис. 3. Часть диаграммы состояния Fe–C [16, с. 156]: A – аустенит; Φ – феррит; P – перлит; C – цементит

Возможность таких превращений показана Т. Н. Лоладзе в [10, с. 38]. Износостойкость инструмента для данного диапазона температур зависит от структуры обрабатываемого материала, влияющей на истирающую способность [18]. Из всех структурных составляющих стали наименьшей истирающей способностью обладает феррит – 80 НВ,

далее – зернистый перлит – 150...200 НВ, аустенит – 150...350 НВ [17, с. 170; 18]. Наибольшей истирающей способностью обладает пластинчатый цементит – 1000 НВ, карбиды вольфрама WC – 1500 НВ и т. д. При резании сталей, когда температура контакта превышает AC_3 (температура $\Theta = 727 \dots 911$ °С) (см. рис. 3), структурные и фазовые



превращения в контактных слоях всегда происходят частично или полностью [10, с. 38].

Отсюда можно сделать вывод, что для гарантированного осуществления фазового превращения и получения наивысшей стойкости инструмента обработку сталей необходимо вести при температурах резания выше линий AC_3 и AC_m (примерно на 10...50 °С) кристаллизации аустенита (см. рис. 3) для соответствующего процентного содержания углерода: для доэвтектоидной зоны сплава (до 0,8 % С) – выше линии AC_3 , для заэвтектоидной зоны сплава – выше линии AC_m [16, с. 149], используя следующие зависимости:

$$\Theta_0 \geq 911 + 120C^2 - 326C$$

при $C \leq 0,8 \text{ \% С}$; (7)

$$\Theta_0 \geq 474 + 313C$$

при $C \geq 0,8 \text{ \% С}$, (8)

где Θ_0 – температура резания в градусах Цельсия; C – процентное содержание углерода в сплаве.

Аустенит обрабатываемого металла располагается в тончайшем приторможенном слое стружки, контактирующем с окисной плёнкой передней поверхности резца, уменьшает тангенциальное усилие при продвижении стружки, создавая тем самым оптимальные условия для трения поверхностей, что и определяет наивысшую стойкость инструмента при скорости резания V_0 (см. рис. 1). При скорости резания V_0 имеем оптимальную толщину окисной плёнки и оптимальную температуру на передней поверхности резца, равную 750...850 °С [6, с. 162].

Установлено, что химическое строение металла оказывает существенное влияние на износ, который в сильной степени зависит от содержания углерода в сплаве. Чем выше процентное

содержание углерода, тем выше его истирающая способность [8, с. 98; 18].

Профессор А. Д. Макаров вывел закон, носящий характер всеобщности, что «оптимальным скоростям резания для данного сочетания материала детали и инструмента при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания соответствует постоянная оптимальная температура в зоне резания, являющаяся физической контактной для заданной пары резец – деталь» [9, с. 67]. Эта температура соответствует максимальной размерной стойкости инструмента. На основании результатов тех же исследований профессора А. Д. Макарова и других материалов исследований [9, с. 72] можно продолжить и несколько уточнить и дополнить данный закон в следующем: «при обработке железоуглеродистых сплавов для средних и больших скоростей резания постоянная оптимальная температура удовлетворительно совпадает с температурой кристаллизации структуры аустенита для соответствующего процентного содержания углерода в сплаве» (см. рис. 3). Это значительно упростит поиск оптимальной температуры резания, используя зависимости (7) и (8).

При наличии в растворе стали фазы аустенита износ инструмента происходит при повышенной температуре в результате сил молекулярного сцепления, приводящих к отрыву частиц, в основном кобальта, интенсивность износа при этом меньше, чем абразивного [8, с. 128].

Теперь необходимо установить зависимость величины температуры от скорости резания. Температуру резания можно определить, зная величины скоростей от V_{01} до V_m , при которых температура равна 300 и 600 °С соответственно [6, 15].

Скорость резания V_m в точке $M (V_m, T_m)$ (см. рис. 1) «дна впадины» определяется из равенства периодов стойкости [12]



$$T_{01} = f(V) = T_0 = f(V), \quad (9)$$

где

$$T_0 = T_n \cdot e^{\frac{1}{2} \left[1 - \left(5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)^2 \right]}; \quad (10)$$

$$V_n = C^{1,25} \left(\frac{U_0}{1000 \cdot \delta_0 \cdot K_p} \right)^{0,25}; \quad (11)$$

$$C = \frac{C_v \cdot K_v}{t^x \cdot S^y}; \quad (12)$$

$$T_n = \frac{1000 \cdot \delta_0 \cdot K_p}{V_n \cdot U_0}, \quad (13)$$

где T_0 – период стойкости инструмента, мин; V_n , T_n – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, инструмента в точке перегиба кривой $T_0 = f(V)$ (см. рис. 1); t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; δ_0 – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм; K_p – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности в размерный, $K_p \approx \operatorname{tg} \alpha_z$ (α_z – задний угол заточки резца); U_0 – величина относительного размерного износа лезвия резца, мкм/км; C_v , K_v , x , y – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [13, с. 269].

После преобразования и решения (9) получим

$$V_m^2 - 2C_1 V_m - C_2 = 0. \quad (14)$$

Откуда имеем

$$V_m = C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2}; \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{C_\alpha V_n - 20V_{01}}{C_\alpha V_n^2 - 25V_{01}^2} V_{01} \cdot V_n; \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{(16 + A_{01} - C_\alpha) V_{01}^2 \cdot V_n^2}{C_\alpha V_n^2 - 25V_{01}^2}; \quad (17)$$

$$A_{01} = \frac{21 \operatorname{lg} \left(\frac{T_{n2}}{T_n} \right)}{\operatorname{lg} e}; \quad (18)$$

$$C_\alpha = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^2, \quad (19)$$

где V_m – скорость резания в точке M , м/мин.

Значение периода стойкости в точке M при скорости V_m определяется из зависимости (10) как

$$T_{.M} = T_n \cdot e^{\frac{1}{2} \left[1 - \left(5 \frac{V_m}{V_n} - 4 \right)^2 \right]}. \quad (20)$$

Зная величины скоростей от V_{01} до V_m и температур при их значениях, равных соответственно 300 и 600 °С, легко, с использованием зависимостей (7) и (8), определяется скорость резания V_0 :

$$V_0 = V_{01} \left(\frac{\Theta_0}{300} \right)^{\frac{1}{x_1}}, \quad (21)$$

где

$$x_1 = \frac{\operatorname{lg} 600 - \operatorname{lg} 300}{\operatorname{lg}(V_m / V_{01})} = \frac{0,301}{\operatorname{lg}(V_m / V_{01})}. \quad (22)$$

Так, при обработке стали 40 резцом Т15К6 на режимах $t = 1,0$ мм; $S = 0,24$ мм/об имеем следующее [2]: $V_{01} = 40$ м/мин; $T_{01}^{\max} = 244$ мин; $T_{n2} = 148$ мин; $V_{n2} = 70$ м/мин; $\alpha = 0,571$. По зависимости $T_0 = f(V)$ при значениях [13] $U_0 = 5$ мкм/км; $\delta_0 = 500$ мкм; $K_p = 0,176$; $x = 0,15$; $y = 0,2$; $K_v = 0,76$; $C_v = 420$ определяем $C = 422$; $V_n = 166,0$ м/мин; $V_0 = 132$ м/мин;



$T_n = 106$ мин; $V_m = 88$ м/мин; $\Theta_0 = 800$ °С;
 $x_1 = 0,88$; $V_0 = 122$ м/мин.

Как видно из расчёта, посредством определения оптимальной скорости резания V_0 наибольшей скорости инструмента по методике [12] имеем скорость резания $V_0 = 132$ м/мин, а по приведенной в настоящей работе – $V_0 = 122$ м/мин. Несовпадение скоростей V_0 составляет меньше 8 %. Это свидетельствует о том, что обе методики рабочие.

С другой стороны, определяя величину оптимальной температуры резания Θ_0 по зависимостям (7) и (8) и величину скорости резания V_0 [12], можно найти скорость резания V_{01} , соответствующую максимальной стойкости инструмента при наростообразовании, по следующей зависимости:

$$V_{01} = V_0 \left(\frac{\Theta_{01}}{\Theta_0} \right)^{\frac{1}{x_1}}, \quad (23)$$

где x_1 – показатель степени,

$$x_1 = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg V_0};$$

Θ_n – температура в начале обработки, $\Theta_n = 20 \dots 25$ °С; Θ_{01} – температура резания при скорости резания V_{01} , $\Theta_{01} = 300$ °С; V_0 – скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента второго «горба» (см. рис. 1).

Заключение

1. Дополнен известный закон о выборе оптимальной скорости резания при обработке стальных заготовок с учётом состояния диаграммы сплава железо–углерод.

2. Получены формулы по определению оптимальной скорости резания в зависимости от температуры фазовых превращений стали и содержания углерода в сплаве.

3. Установлен диапазон скоростей резания минимальной стойкости инструмента от V_{n2} до V_m , обработку в котором для повышения его износостойкости желательно осуществлять резцом с регулярным микрорельефом на передней его поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатуров, Д. Г. Состояние и пути повышения износостойкости лезвийного инструмента в широком диапазоне изменения скорости резания / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, М. В. Панков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 100–109.
2. Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. – Москва: Машиностроение, 1982. – 112 с.
3. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
4. Аваков, А. А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов / А. А. Аваков. – Москва: Машгиз, 1960. – 308 с.
5. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.
6. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
7. Шатуров, Д. Г. Технологические возможности управления режущей способностью лезвийного инструмента / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 112–119.
8. Даниелян, А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – Москва: Машиностроение, 1954. – 276 с.
9. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 279 с.



10. **Лоладзе, Т. Н.** Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
11. **Зорев, Н. Н.** О процессе износа твердосплавного инструмента / Н. Н. Зорев, Д. Н. Клауч, В. А. Батырев // Вестн. машиностроения. – 1971. – № 11. – С. 70–73.
12. **Шатуров, Д. Г.** Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 90–98.
13. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 495 с.
14. **Ящерицын, П. И.** Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 560 с.
15. **Кожевников, Д. В.** Резание металлов: учебник для вузов / С. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
16. **Гуляев, А. П.** Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1985. – 348 с.
17. **Вульф, А. М.** Резание металлов / А. М. Вульф. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 495 с.
18. **Фельдштейн, Э. И.** Обрабатываемость сталей / Э. И. Фельдштейн. – Москва: Машгиз, 1953. – 254 с.
19. **Маталин, А. А.** Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов / А. А. Маталин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496 с.

Статья сдана в редакцию 20 мая 2019 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-297-46-19-67.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.
Tel.: +375-297-46-19-67.

