

УДК 621.97

*Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, М. В. Панков*

## СОСТОЯНИЕ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

UDC 621.97

*D. G. Shaturov, G. F. Shaturov, M. V. Pankov*

## CURRENT STATUS AND WAYS OF INCREASING WEAR RESISTANCE OF EDGE TOOLS OVER A WIDE RANGE OF CUTTING SPEEDS

### Аннотация

На основе известных источников технической литературы проанализировано состояние и рассмотрена возможность применения существующих методик определения стойкости и ресурса работы твердосплавного лезвийного инструмента при низких и средних скоростях резания.

### Ключевые слова:

резец, обработка, стойкость, ресурс работы инструмента, скорость резания, износ.

### Abstract

Based on the analyses of the well-known literature sources, the possibility of applying the existing techniques to determine the durability and service life of cemented-carbide tools at low and medium cutting speeds is considered.

### Key words:

cutter, machining, tool durability, tool service life, cutting speed, wear.

При обработке углеродистых и некоторых легированных сталей твердосплавным инструментом связь между скоростью резания  $V$  и периодом стойкости  $T_0$  инструмента представляет собой периодически изменяющуюся плавную кривую в общем случае с двумя или тремя максимумами, расположенными на разных уровнях по стойкости и точками перегиба при разных скоростях резания [1]–[4], [10].

Режущий инструмент в зависимости от условий обработки может подвергаться механическому, абразивному, адгезионному, окислительному (химическому) и диффузионному износу [3, с. 189], [9, с. 5]. Процесс износа бы-

вает смешанным, состоящим одновременно как минимум из двух видов износа, один из которых в данный момент времени доминирует, т. е. в большей степени влияет на изнашивание, чем другие. Это явление А. И. Каширин, П. П. Грудов, А. Я. Малкин и др. связывают с переходом при изменении скорости резания из одной физической формы износа в другую [4, с. 28], например, от механического к абразивно-механическому и далее к абразивно-адгезионному, от окислительного к диффузионному и т. д.

Так, при увеличении скорости резания от 1 м/мин плавная кривая периода стойкости инструмента от скорости ре-

зания может иметь два и даже три пика, или «горба», и «впадины», соответствующие максимальной и минимальной стойкости инструмента [4, с. 24]. Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых подтверждают, что зависимость  $T = f(V)$  носит экстремальный характер в области низких и больших скоростей резания [4, с. 14]. А. Я. Малкин при обработке хромомолибденовой стали твердым сплавом ВК8 обнаружил пик стойкости при скорости резания  $V = 20$  м/мин. П. П. Грудов при обработке стали марки 45 резцом Т15К6 обнаружил пик стойкости при  $V = 70$  м/мин. Н. И. Резников и И. Г. Жарков при фрезеровании стали марки 50А твердым сплавом Т15К6 обнаружили пик стойкости при  $V = 170$  м/мин и т. д.

Существование «горбов» и перегибов на кривых стойкости обусловлено изменением природы и интенсивности изнашивания при переходе от одного вида износа в другой. «Горбы» свидетельствуют о динамической стабилизации и оптимальных условиях трения в контактных зонах инструмента со сходящей стружкой и поверхностью резания заготовки. До «горба» и после него условия трения в контактных зонах инструмента не стабильны.

При увеличении скорости резания в контактных зонах трения происходит перестройка процесса изнашивания. Один вид износа постепенно замещается другим на основе принципа самоорганизации. В результате самоорганизации процесс трения энергетически стремится к стабилизации с минимальным потреблением энергии исходя из представленных ему внешних условий [14].

При обработке деталей из труднообрабатываемого жаропрочного сплава ХН51ВМТЮКФР на относительно низкой скорости резания  $V = 5$  м/мин поверхность изношенной фаски на задней

поверхности инструмента из твердого сплава ВК6М и Т15К6 покрыта сплошным слоем материала детали [9, с. 13]. Прилипший слой материала детали в виде нароста подвержен пластической деформации. В результате его твердость в 1,8...2,4 раза выше твердости обрабатываемого материала, и он предохраняет от износа рабочие поверхности резца, стойкость которого при скорости  $V = V_{01}$  наибольшая (рис. 1). При резании на скоростях резания, меньших  $V < 5$  м/мин и больших  $V > 5$  м/мин, для этого сплава износ резца связан с адгезионными явлениями, и его стойкость уменьшается [9, с. 13].

При обработке углеродистой стали марки 40Х экстремум функции  $T = f(V)$  сдвинут в сторону больших скоростей резания. При увеличении скорости резания до 15 м/мин с повышением температуры в зоне резания механический износ переходит в механическо-адгезионный, что уменьшает период стойкости инструмента [3, с. 212], [6, с. 263], [11].

Под адгезионным износом инструмента понимают срез или отрыв силами адгезии (сцепления, сваривания, прилипания) частиц инструментального материала в процессе трения [3, с. 189]. Размеры отдельных адгезионных пятен, углублений, изъянов соответствуют размерам зерен карбидов вольфрама твердого сплава и колеблются от нескольких микрометров (2...5 мкм) до сотых долей миллиметра, а истинная площадь контакта может составлять 10...60 % номинальной площади контакта [3, с. 191], [9, с. 6]. В [3] подсчитано, что на одном метре пути резания каждая точка на поверхности инструмента подвергается 1000-кратному воздействию срезающих напряжений, что приводит к разупрочнению, окрупчиванию и усталостному ее разрушению. Интенсивность адгезионного отрыва зависит от свойств обрабатываемого и инструментального материалов и усло-

вий обработки: скорости и температуры резания, отношения прочности материала инструмента к прочности материала обрабатываемой заготовки [9, с. 6].

При дальнейшем увеличении скорости резания  $V > V_{.m1}$  (см. рис. 1) для стали марки 40X  $V > 15...20$  м/мин,

а следовательно и температур, мелкие частицы стружки в некоторых местах контакта прилипают, привариваются к чистой, ювенальной (лишенной окислов) передней поверхности инструмента, образуя прочное соединение в виде заторможенного слоя – нароста [3, с. 213].

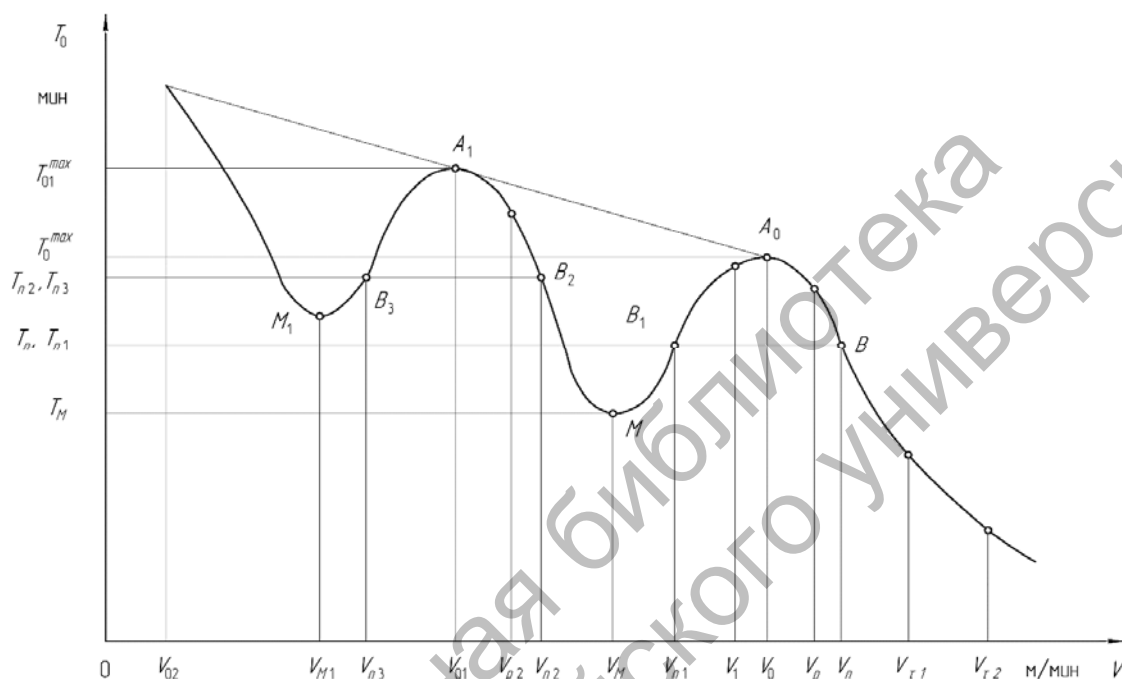


Рис. 1. Зависимость периода стойкости лезвийного инструмента от скорости резания

При скорости резания  $V = V_{01} = 40...50$  м/мин (для разных материалов этот диапазон скоростей разный) при обработке углеродистой стали и температуре резания  $300^\circ\text{C}$  высота нароста максимальна, а износ резца минимален [2, с. 86]. Нарост выполняет защитные функции по отношению к инструменту [6, с. 112] и препятствует изнашиванию контактных поверхностей инструмента от адгезионного износа. На кривой  $T = f(V)$  имеется в этом случае «горб» с вершиной – точкой  $A_1(V_{01}, T_{01})$  (см. рис. 1). Отметим, что нарост имеет твердость, превышающую в 2,5...3 раза твердость обрабатываемого материала [6, с. 107], и расположен на передней поверхности резца в форме клина с передним положительным углом, боль-

шим, чем передний угол заточки инструмента [6, с. 112]. Нарост, по сути, выполняет роль нового инструмента с большим положительным передним углом. В зоне образования нароста, где его высота максимальна, коэффициент трения [6, с. 124], [8, с. 17], коэффициент усадки стружки, тангенциальная сила резания [6, с. 207] и максимальная стойкость инструмента [6, с. 263] минимальны.

При низких скоростях резания ( $V = 20...55$  м/мин) при увеличении подачи и глубины резания получаем примерно одну и ту же величину скорости резания  $V_{01}$  (см. рис. 1), при которой достигается максимальная стойкость инструмента [3, с. 215], [5, с. 150]. При средних и больших скоростях реза-

ния  $V > 80$  м/мин, наоборот, имеет место большая разбежка положения экстремума вдоль оси скорости резания [7], [12]. В случае обработки с низкими скоростями резания в зоне наростообразования при увеличении подачи увеличивается толщина срезаемого слоя металла и высота нароста, что сдвигает экстремум функции  $T = f(V)$  в сторону меньших скоростей резания. Одновременно с увеличением высоты нароста увеличивается фактический передний угол инструмента, что сдвигает экстремум функции в сторону больших скоростей резания [6, с. 112]. В результате действия двух факторов в противоположных направлениях экстремум функции  $T = f(V)$  практически может остаться при одной и той же скорости резания [2, с. 86], [5, с. 150]. Кроме того, нарост блокирует тепловые и деформационные процессы в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента, что положительно отражается на его стойкости.

Нарост состоит из двух частей – верхней («шапки») и нижней («подшвы»). Верхняя часть нароста срывается и восстанавливается в 450...660 раз в секунду [9, с. 34]. При повышении скорости резания  $V > 40...50$  м/мин наблюдается повышение температуры резания от 300 до 600 °С. Нарост постепенно вырождается в слой параллельной передней поверхности инструмента, а затем исчезает вовсе. Продукты нароста, срываясь, проникают на заднюю поверхность резца, внедряются в контактные поверхности инструмента, царапают эти поверхности, действуя как микроскопические резцы, т. е. происходит абразивный износ лезвия. Наблюдаемые на задней поверхности инструмента канавки, перпендикулярные к режущей кромке, являются результатом абразивного воздействия отделяющихся частиц нароста [3, с. 196].

При исчезновении нароста с перед-

ней поверхности происходит его срыв с образованием углублений 2...5 мкм на передней поверхности инструмента в результате абразивно-адгезионного износа [9, с. 6]. Стойкость резца падает до момента (точка  $M(V_m, T_m)$ ) – начала образования тонкой и несплошной подстилки в виде окисной пленки, имеющей ячеистый вид и уменьшающей износ лезвия [15, с. 162].

При увеличении скорости резания  $V > V_m$  (см. рис. 1) повышается температура в зоне резания и пропорционально ей толщина окисной пленки, а абразивно-адгезионный износ постепенно уступает место абразивно-окислительному износу, где окисление является преобладающим. Если контактирующие твердые тела покрыты окисными пленками, то в адгезионное взаимодействие вступают пленки и защищают от схватывания и износа лежащие под ними тела. Стабилизация в зоне трения достигается при скорости резания  $V_0$  (см. рис. 1) (для углеродистой стали марки 45  $V_0 = 160...180$  м/мин), при которой имеет место оптимальная толщина 2...15 мкм окисной пленки [9, с. 17], покрывающей почти все зоны контакта инструмента с заготовкой и стружкой и тем самым уменьшающей интенсивность изнашивания, т. к. их предотвращает непосредственный контакт. При скорости резания  $V = V_0$  наблюдается окислительный и оптимальный износ лезвия и оптимальные условия трения (второй «горб» на кривой периода стойкости от скорости резания). Окислительным износом называют установившийся стационарный процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных пленок, где окисление является преобладающим [9, с. 8].

При дальнейшем увеличении скорости резания  $V > V_0$  и росте температуры толщина окисной пленки увеличивается, а ее прочность уменьшается. Образование более толстых и рыхлых

пленок, имеющих микропоры, приводит к их разрушению, и пленки в таком случае выступают в роли абразивного материала, что резко увеличивает абразивно-окислительный износ инструмента [9, с. 8].

Абразивно-окислительный износ переходит в фазу диффузионного с резким уменьшением стойкости инструмента.

Под диффузионным износом понимают износ инструмента, происходящий при высоких температурах ( $\Theta \geq 1000$  °С) в результате взаимной диффузии материалов детали и инструмента [3, с. 199]. В результате диффузионных процессов в поверхностных слоях инструмента происходят структурные превращения, приводящие к охрупчиванию и разупрочнению поверхности инструмента [9, с. 7]. Сходящая стружка и поверхность резания обрабатываемого материала сносит разупрочненную поверхность инструмента. Согласно А. Я. Малкину, функция  $T_0 = f(V)$  в этом случае может быть выражена уравнением  $T = ce^{av}$  [4, с. 30].

Анализ источников технической литературы показывает, что на износостойкость лезвийного инструмента существенное влияние оказывают температура в зоне резания и температура на задней поверхности резца, которые зависят от скорости резания и толщины срезаемого слоя металла.

По представлению Б. Н. Костецкого, в зависимости от скорости и температуры в зоне резания износ инструмента связан с явлениями схватывания (сваривания) поверхностей контакта и окисления. Износ при трении со схватыванием при малых скоростях в сотни раз, а при увеличении скоростей в десятки раз больше, чем износ при окислении [4, с. 26]. Чередование износа инструмента со схватыванием и окисления, по теории Б. Н. Костецкого, приводит к обоснованию и «двугорбых» кривых периода стойкости от скорости резания. И. В. Крагельский и Е. М. Шев-

цова в своих исследованиях по износу пришли к выводу, что «в области малых скоростей скольжения искусственно нанесенные пленки могут значительно снизить интенсивность изнашивания, приводя к локализации деформации в поверхностном слое; при больших скоростях скольжения локализация может осуществляться при изменении механических свойств от температуры, развивающейся при работе трения» [4, с. 27].

«Максимум пройденного пути до затупления инструмента для различных толщин среза наблюдается примерно при одинаковых температурах резания, соответствующих минимальной интенсивности адгезионного износа» [3, с. 216]. При обработке стали марки 40Х резцом марки Т15К6 максимальный путь резания соответствует температуре 700...730 °С, а при обработке стали Х18Н9Т и ШХ15 резцом марки ВК8 – 560...600 °С.

При одинаковых температурах контакта на задней поверхности путь резания до затупления инструмента и его стойкость изменяются для разных толщин среза [3, с. 216]. Утверждается [3, с. 217], что максимальная площадь обработанной поверхности и оптимальные режимы обработки должны определяться с учетом толщины срезаемого слоя металла и построения кривых  $V\tau_a = f(V)$  для разных толщин среза. Влияние ширины среза на стойкость инструмента менее заметно.

На основании анализа источников литературы по износу и стойкости лезвийного инструмента можно сделать несколько выводов.

1. Целесообразно искусственно создавать условия для образования и стабилизации окисных пленок в диапазоне низких и средних скоростей резания, где имеет место абразивно-адгезионный износ со схватыванием. Это относится к диапазону скоростей резания в окрестностях точек  $M_1(V < V_{n3})$  и  $M(V_{n2} < V < V_{n1})$  (см. рис. 1).

2. Целесообразно искусственно создавать условия для образования и стабилизации окисных пленок при окислительно-диффузионном изнашивании, т. е. для диапазона скорости резания  $V > V_n$ .

3. Барьером для уменьшения или ликвидации адгезионного износа может служить искусственно созданный микрорельеф на рабочих поверхностях инструмента, способствующий образованию окисных пленок.

Для определения величины указанных скоростей резания и периодов стойкости инструмента воспользуемся методиками [7], [12]. Для установления пригодности этих методик для низких и средних скоростей резания используем экспериментальные результаты, полученные канд. техн. наук Л. С. Сенчевой при обработке стали 45 твердосплавным резцом Т15К6, представленными проф. Г. И. Грановским в [2, с. 86]. Таким образом, имеем [12]

$$V_n = C^{1,25} \left( \frac{u_0}{1000 \delta_0 \cdot K_p} \right)^{0,25}; \quad (1)$$

$$C = \frac{C_v \cdot K_V}{t^x \cdot S^y}; \quad (2)$$

$$T_n = \frac{1000 \delta_0 \cdot K_p}{V_n \cdot u_0}; \quad (3)$$

$$n_0 = \left( \frac{T_0 V \cdot u_0}{1000 \delta_0 \cdot K_p} \right)^{1,67}, \quad (4)$$

где  $V_n, T_n$  – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, инструмента в точке В перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  (см. рис. 1);  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $\delta_0$  – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм;  $K_p$  – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности в

размерный,  $K_p \approx \operatorname{tg} \alpha_3$  ( $\alpha_3$  – задний угол заточки резца);  $u_0$  – величина относительного размерного износа лезвия резца, мкм/км;  $n_0$  – показатель степени интенсивности изнашивания задней поверхности резца;  $C_v, K_V, x, y$  – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [13, с. 269].

Предполагая идентичность изменения периода стойкости  $T_{01}$  инструмента от скорости резания  $T_{01} = f(V)$  в пределах участков кривой  $BA_0B_1$  [7] и  $B_2A_1B_3$  (см. рис. 1), можно записать

$$T_{01} = \frac{T_{n2} \cdot \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( \frac{V - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)}}; \quad (5)$$

$$T_{n2} = \frac{T_{01}^{\max}}{\sqrt{e}}; \quad (6)$$

$$V_{n2} = \frac{T_n V_n \cdot u_0}{T_{n2} \cdot u_{02}}; \quad (7)$$

$$n_0 = \left[ \frac{T_{01} V \cdot u_{02}}{1000 \delta_0 \cdot K_p} \right]^{1,67}, \quad (8)$$

где  $V_{n2}, T_{n2}$  – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, резца в точке  $B_2$  перегиба  $n_0 = 1,0$  кривой  $T_{01} = f(V)$ ;  $u_{02}$  – величина относительного размерного износа лезвия резца на участке  $B_2A_1B_3$ , мкм/км;  $V_{01}, T_{01}^{\max}$  – скорость резания, м/мин, и соответствующий ей период стойкости, мин, на участке кривой  $B_2A_1B_3$ .

Пригодность зависимостей (5)–(8) проверялась (использовались экспериментальные данные (показаны в скобках) и данные [2, с. 86]) при обработке стали марки 45 резцом Т15К6 при глубине резания  $t = 1,0$  мм и подачах

$s = 0,12; 0,24; 0,46$  мм/об (табл. 1).  
 Принимая для подачи  $s = 0,12$  мм/об значения  $u_0 = u_{02} = 7$  мкм/км, получим  $V_n = 267$  м/мин,  $T_n = 47$  мин,  $V_0 = 214$  м/мин. Исходя из экспериментальных данных  $V_{01} = 40$  м/мин,  $T_{01}^{\max} = 308$  мин,  $V_{n2} = 67,5$  м/мин [2, с. 86], из (6)–(8) имеем  $T_{n2} = 67,2$  мин и  $n_0 = 1,0$  для точки перегиба  $B_2$ . Преобразуем зависимость (5) исходя из соотношения

$$\frac{V_{01}}{V_{n2}} = \frac{40}{67,5} = 0,593 \approx 0,6.$$

$$T_{01} = \frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( 2,5 \frac{V}{V_{n2}} - 1,5 \right)^2}}. \quad (9)$$

Отметим, что при обработке различных материалов, при неизменной зависимости (5), соотношение  $V_{01}/V_{n2}$  может изменяться в широких пределах от 0,3 до 0,8. Это повлечет за собой и изменение зависимости (9).

В табл. 1 представлены результаты расчетов по формуле (9) и данные эксперимента [2, с. 86] – погрешность для выбранного диапазона скоростей не превышает 6 %.

Табл. 1. Значения периодов стойкости для низкого диапазона скоростей резания

$V$ , м/мин	30	40 ( $V_{01}$ )	50	53,6 ( $V_{p2}$ )	60	67,5 ( $V_{n2}$ )	70
$S = 0,12$ мм/об ( $u_{02} = 7$ мкм/км)							
$T_{01}^{рас.}$ , мин	286,5	308	285	271,8	234	187	166
$T_{01}^{экс.}$ , мин	277 (280)	308 (306)	288 (293)	265,2	230 (225)	187 (190)	173
$\varepsilon$ , %	3,4	0	1,0	2,4	1,7	0	4
$S = 0,24$ мм/об ( $u_{02} = 9$ мкм/км)							
$T_{01}^{рас.}$ , мин	228	244	227	215,3	183,4	148	128,6
$T_{01}^{экс.}$ , мин	218	244	226	211,3	180	148	131
$\varepsilon$ , %	4,6	0	0,4	1,86	1,9	0	1,8
$S = 0,46$ мм/об ( $u_{02} = 19$ мкм/км)							
$T_{01}^{рас.}$ , мин	110,6	117,5	107,6	103,6	85	71,3	58
$T_{01}^{экс.}$ , мин	104	117,5	108	102,5	82	71,3	61
$\varepsilon$ , %	5,96	0	0,37	1,0	3,5	0	4,9
Примечание – $T_{01}^{рас.}$ , $T_{01}^{экс.}$ – расчетное и экспериментальные значения периода стойкости; $\varepsilon$ – несовпадение расчетных и экспериментальных значений							

Период стойкости  $T_{n2}$  определяли по (6), исходя из экспериментального значения  $T_{01}^{\max}$  [2, с. 86], а скорость  $V_{n2}$  – по значению  $T_{n2}$ , исходя из двух близлежащих экспериментальных величин  $T_{01}$ . Затем рассчитывали относительный размерный износ  $u_{02}$  для точки перегиба  $B_2$ ,

в которой  $n_0 = 1,0$ , по зависимости

$$u_{02} = \frac{1000 \delta_0 \cdot K_p}{T_{n2} \cdot V_{n2}}. \quad (10)$$

Отметим, что с увеличением подачи растет и  $u_{02}$ , что согласуется с данными, приведенными в [16, с. 75].

Зависимость  $u_{02}$  определяется из формулы, которая получена на основании результатов экспериментальных данных [2, с. 86]:

$$u_{02} = 84,67S^2 - 13,8S + 7,5. \quad (11)$$

Скорость резания, соответствующая максимальному ресурсу работы инструмента на участке  $B_2A_1B_3$  (см. рис. 1), находим исходя из формулы ресурса работы инструмента [5, с. 152]

$$L = VT_{01} = V \frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( 2,5 \frac{V}{V_{n2}} - 1,5 \right)^2}}. \quad (12)$$

Для определения экстремума функции (12) возьмем производную  $dL/dV$  и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dL}{dV} = T_{n2} \sqrt{e} e^{-\frac{1}{2} \left( 2,5 \frac{V}{V_{n2}} - 1,5 \right)^2} \times \\ \times \left[ 1 - V \left( 2,5 \frac{V}{V_{n2}} - 1,5 \right) \frac{2,5}{V_{n2}} \right] = 0,$$

откуда получаем уравнение

$$V^2 - 0,6V_{n2}V - \frac{V_{n2}^2}{6,25} = 0. \quad (13)$$

Решая, имеем

$$V_{p2} = 0,8V_{n2}, \quad (14)$$

где  $V_{p2}$  – скорость резания, соответствующая максимальному ресурсу работы инструмента.

Скорость резания для точки  $M$  графика  $T_0 = f(V)$  (см. рис. 1) рассчитывалась как средняя величина скоро-

стей  $V_{n1} = 0,6V_n$  [12] и  $V_{n2}$ :

$$V_m = \frac{1}{2}(V_{n1} + V_{n2}). \quad (15)$$

Скорость резания  $V_{n3}$  для точки  $B_3$  (см. рис. 1) определялась по формуле (9) при  $T_{01} = T_{n2}$ , на основании этого получаем  $V_{n3} = 0,2V_{n2}$ . Величина указанных скоростей резания приведена в табл. 2.

Работа на скоростях резания  $V_{p2}$  и  $V_p = 0,847V_n$  [12] обеспечивает минимальный расход инструмента и наивысшую размерную стойкость.

Однако иногда оптимизацию технологического процесса обработки производят по себестоимости операции. «Проведенные для различных обрабатываемых материалов расчеты  $V_s$  (экономическая скорость резания) показывают, что величина  $V_s = (1,2...1,25)V_p$ , а для труднообрабатываемых материалов скорости  $V_s$  и  $V_p$  практически совпадают» [9, с. 93].

Таким образом, установлены диапазоны скоростей резания, при которых желательно уменьшить или исключить адгезионный износ лезвий инструмента, например, путем создания на его рабочих поверхностях микрорельефа, способствующего образованию тонкого слоя окисных пленок.

Установлены зависимости по определению периода стойкости и скорости резания, обеспечивающей максимальный ресурс работы инструмента, для низких и средних скоростей резания.



Табл. 2. Значения периодов стойкости для широкого диапазона скоростей резания

Подача $S$ , мм/об	Скорость резания $V$ , м/мин											
	$V_n$	$V_p$	$V_s$	$V_0$	$V_1$	$V_{n1}$	$V_m$	$V_{n2}$	$V_{s1}$	$V_{p2}$	$V_{01}$	$V_{n3}$
0,12	267	226	276	213,6	187	160	113,7	67,5	66	54	40	13,5
	Стойкость резца, мин											
	$T_n$	$T_p$	$T_s$	$T_0^{\max}$	$T_1$	$T_{n1}$	$T_m$	$T_{n2}$	$T_{s1}$	$T_{p2}$	$T_{01}$	$T_{n3}$
	47	75	39	77	68,4	47	13,4	187	196	271,8	308	187
0,24	225	190,6	223,5	180	157,5	135	100,75	66,5	65	53,2	40	13,3
	Стойкость резца, мин											
	$T_n$	$T_p$	$T_s$	$T_0^{\max}$	$T_1$	$T_{n1}$	$T_m$	$T_{n2}$	$T_{s1}$	$T_{p2}$	$T_{01}$	$T_{n3}$
	56	90	57,7	92	81,5	56	19,5	148	120,8	215,3	244	148
0,46	176	149	182,5	141	123	105,6	85,4	65,1	63,8	52,1	40	13,0
	Стойкость резца, мин											
	$T_n$	$T_p$	$T_s$	$T_0^{\max}$	$T_1$	$T_{n1}$	$T_m$	$T_{n2}$	$T_{s1}$	$T_{p2}$	$T_{01}$	$T_{n3}$
	71,4	114	58	117	104	71,4	34	71,3	89,6	103,6	117,5	71,3
Примечание – $V_s = 1,225V_p \approx 1,04V_n$ ; $V_{s1} = 1,225V_{p2} = 0,98V_{n2}$												

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Выш. шк., 1990. – 512 с.
2. Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. – М. : Машиностроение, 1982. – 112 с.
3. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.
4. Аваков, А. А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов / А. А. Аваков. – М. : Mashchiz, 1960. – 308 с.
5. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с.
6. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : 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. – М. : Машиностроение, 1954. – 276 с.
9. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 279 с.
10. Лоладзе, Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : 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. Мещеркова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2.
14. Мрочек, Ж. А. Использование явления самоорганизации процесса трения для повышения стойкости режущих инструментов / Ж. А. Мрочек, Г. Ф. Шатуров, Д. Г. Шатуров // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 4. – С. 29–32.

15. **Кожевников, Д. В.** Резание металлов : учебник для вузов / С. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 2012. – 304 с.

16. **Соколовский, А. П.** Точность механической обработки и пути ее повышения / А. П. Соколовский. – М. : Машиностроение, 1951. – 487 с.

*Статья сдана в редакцию 4 января 2017 года*

**Денис Геннадьевич Шатуров**, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-67-98.

**Геннадий Филиппович Шатуров**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-67-98.

**Максим Владимирович Панков**, инженер, ОАО «Стандарт». Тел.: +375-222-25-67-98.

**Denis Gennadyevich Shaturov**, PhD (Engineering), Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-67-98.

**Gennady Filippovich Shaturov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-67-98.

**Maksim Vladimirovich Pankov**, engineer, «Standard» company. Phone: +375-222-25-67-98.