

УДК 621.97

Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров

## РЕСУРС РАБОТЫ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ

UDC 621.97

D. G. Shaturov, G. F. Shaturov

## SERVICE LIFE OF BLADE TOOLS DURING MACHINING

**Аннотация**

Предложена методика расчета и получена зависимость для определения ресурса работы лезвийного инструмента – призматического резца, учитывающая режимы обработки и характер изменения стойкости от скорости резания. Показано влияние глубины, подачи и скорости резания на величину максимальной стойкости инструмента и интенсивность его изнашивания.

**Ключевые слова:**

резец, интенсивность изнашивания, стойкость, обработка, скорость резания, ресурс работы инструмента.

**Abstract**

The paper offers the method of calculation and gives the dependence for determining service life of a blade tool – a prismatic tool, which takes into account modes of machining and the cutting speed. It shows the impact of cutting depth, feed and cutting rate on the value of maximum tool life and the intensity of its wear.

**Key words:**

cutter, wear intensity, longevity, machining, cutting speed, tool service life.

Ресурс работы инструмента при выбранных режимах резания зависит главным образом от его стойкости. Период стойкости инструмента при токарной обработке определяется преимущественно по износу его задней поверхности, который не должен превышать величины оптимального износа. Текущий износ задней поверхности резца  $h_3$ , мкм, может быть определен по следующей зависимости [1, 2]:

$$h_3 = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau^{n_0}, \quad (1)$$

где  $\delta_0$  – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм;  $\tau$  – время резания, мин;  $T_0$  – период стойкости инструмента, мин;  $n_0$  – пока-

затель степени интенсивности изнашивания задней поверхности резца,

$$n_0 = \left[ \frac{T_0 V u_0}{1000 \delta_0 K_p} \right]^{1,67}; \quad (2)$$

$K_p$  – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности в размерный,

$$K_p = \frac{\sin \varphi + \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \operatorname{tg} \alpha_3; \quad (3)$$

$V$  – скорость резания, м/мин;  $\varphi, \varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане резца, град;  $\alpha_3$  – угол заточки задней поверхности резца, град;  $u_0$  – величина относительного размерно-

го износа лезвия резца ( $u_0 = 5...7$  мкм/км при обработке стали резцом Т15К6) [3].

Износ задней поверхности резца (далее – износ лезвия) происходит с текущей скоростью изнашивания  $V_{уз}$ , мкм/мин, задней поверхности резца

$$V_{уз} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} n_0 \tau^{n_0-1} \quad (4)$$

и средними скоростями изнашивания за каждый период работы инструмента [4, 8]

$$V_{1уз} = \frac{\delta_0}{T_0} \frac{1}{n_0}; \quad (5)$$

$$V_{2уз} = \frac{\delta_0}{T_0} n_0^{0,6}; \quad (6)$$

$$V_{0уз} = \frac{\delta_0}{T_0}; \quad (7)$$

где  $V_{1уз}, V_{2уз}, V_{0уз}$  – средние скорости изнашивания лезвия за периоды приработки, установившегося износа и стойкости инструмента соответственно, мкм/мин.

В соответствии с зависимостями (5) и (6) при  $n_0 < 1,0$  средняя скорость изнашивания  $V_{1уз}$  за период приработки больше средней скорости изнашивания  $V_{2уз}$  за период установившегося износа, т. е.  $V_{1уз} > V_{2уз}$  [4].

При  $n_0 > 1,0$ , наоборот,  $V_{1уз} < V_{2уз}$ , при  $n_0 = 1,0$   $V_{1уз} = V_{2уз} = V_{0уз}$  [8].

Отметим, что при  $n_0 \geq 1,0$  отсутствует период приработки. Сразу начинается период установившегося износа лезвия со скоростью изнашивания  $V_{1уз}$ . По окончании этого периода начинается период ускоренного износа лезвия со скоростью изнашивания  $V_{2уз}$ .

Тогда средняя арифметическая скорость изнашивания за период стойкости

инструмента [4]

$$V_{уз}^{cp} = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) = \frac{1}{2} \frac{\delta_0}{T_0} \left( \frac{1}{n_0} + n_0^{0,6} \right). \quad (8)$$

Кривая зависимости средней арифметической скорости изнашивания  $V_{уз}^{cp}$  от показателя степени  $n_0$  имеет экстремум. Для определения  $n_0$  в экстремальной точке берем производную  $V_{уз}^{cp} / dn_0$  и полученную функцию приравниваем к нулю:

$$\frac{1}{2} \frac{\delta_0}{T_0} (-n_0^{-2} + 0,6 n_0^{-0,4}) = 0,$$

откуда получаем оптимальное значение степени  $n_0^{opt} = 1,376$ , при котором имеет место минимальная средняя скорость изнашивания лезвия резца.

Очевидно, что стойкость инструмента значительно повысится при равенстве скоростей изнашивания за период приработки и период установившегося износа. Это имеет место в точке  $B$  перегиба кривой  $T_0 = f(V)$ , когда  $n_0 = 1,0$ . Затем период приработки и период установившегося износа лезвия меняются местами [8].

Из зависимости (2) при равенстве скоростей  $V_{1уз}$  и  $V_{2уз}$  для случая  $n_0 = 1,0$  получим

$$T_n = \frac{1000 \delta_0 K_p}{V_n u_0}, \quad (9)$$

где  $T_n$  – период стойкости резца, мин;  $V_n$  – скорость резания, соответствующая значению показателя степени  $n_0 = 1,0$  в точке  $B$  перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  (рис. 1), м/мин.

С другой стороны, период стойкости  $T_n$  определяется из формулы [3]

$$T_n = \left( \frac{C}{V_n} \right)^5, \quad (10)$$

при этом

$$C = \frac{C_V K_V}{t^x S^y}, \quad (11)$$

где  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $C_V, K_V, x, y$  – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [3].

С помощью выражений (9) и (10), из равенства периодов стойкости в точ-

ке  $B$  перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  определяется скорость резания:

$$V_n = C^{1,25} \left( \frac{u_0}{1000 \delta_0 K_p} \right)^{0,25}. \quad (12)$$

Зависимость  $T_0 = f(V)$  периода стойкости от скорости резания представляет собой плавную кривую, имеющую как минимум две точки перегиба  $B(V_n, T_n)$  и  $B_1(V_{n1}, T_n)$  (см. рис. 1) [5].

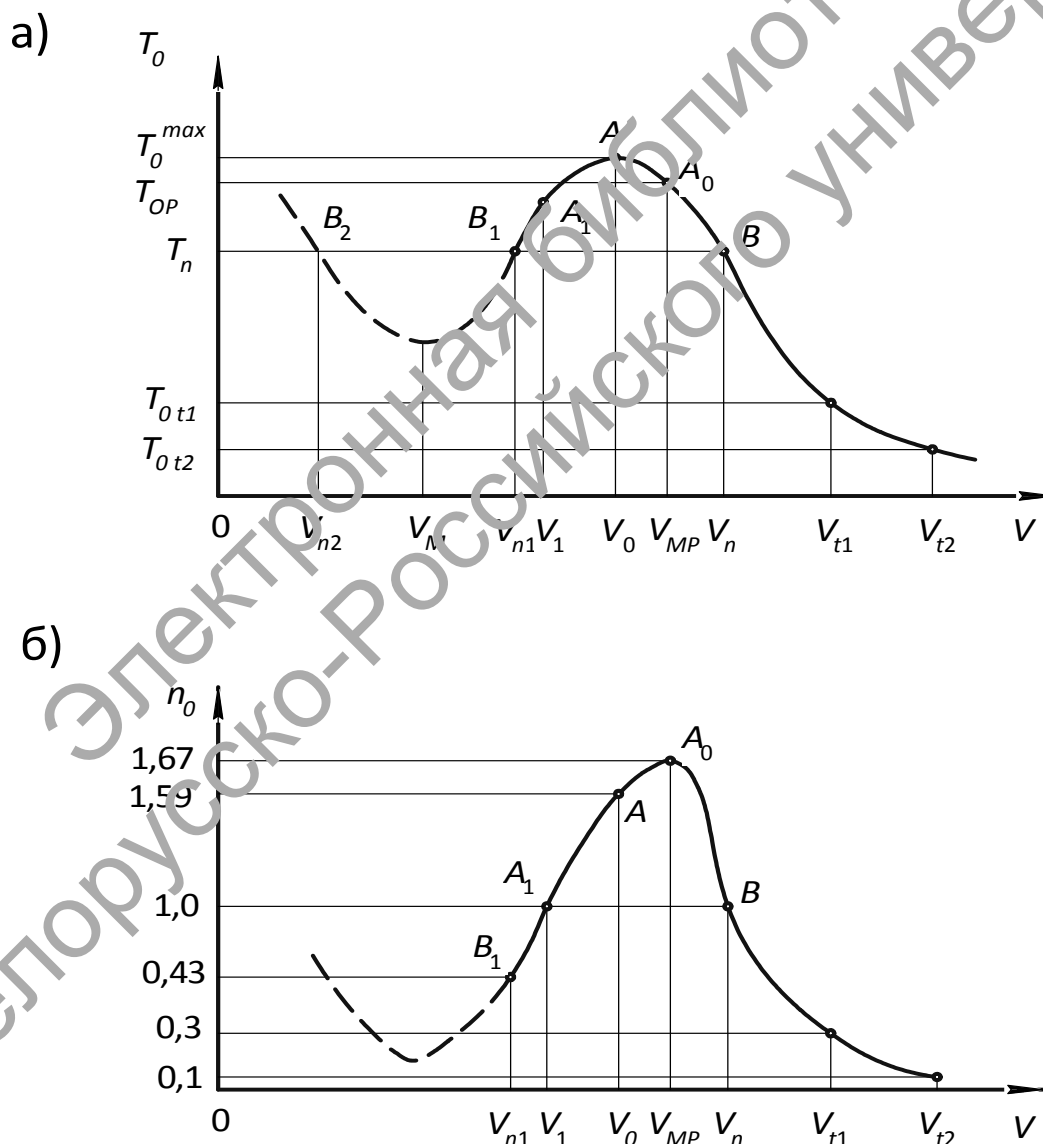


Рис. 1. Изменение периода стойкости  $T_0$  резца (а) и показателя степени  $n_0$  (б) от скорости резания  $V$

Период стойкости  $T_0$  для правой части кривой, лежащей правее точки  $B$ , при  $V \geq V_n$  определяется из следующих равнозначных зависимостей [2, 3]:

$$T_0 = \left(\frac{C}{V}\right)^5; \quad (13)$$

$$T_0 = T_n \left(\frac{V_n}{V}\right)^5. \quad (14)$$

Период стойкости для части кривой, расположенной левее точки  $B(V_n, T_n)$ , при  $V_{n1} \leq V \leq V_n$  определяется из зависимости

$$T_0 = \frac{T_n \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2}\left(\frac{5V}{V_n}-4\right)^2}}. \quad (15)$$

Адекватность зависимостей (14) и (15) доказана в [10].

Значение скорости  $V_0$ , соответствующей максимальному периоду стойкости резца  $T_0^{\max}$ , можно определить, если взять производную  $dT_0/dV$  от выражения (15) и полученную функцию приравнять к нулю. Тогда

$$V_0 = \frac{7}{5}V_n = 0,8V_n, \quad (16)$$

где  $V_0$  – скорость резания, соответствующая максимальному периоду стойкости, м/мин.

Подставив значение  $V_0$  в (15), имеем (см. рис. 1)

$$T_0^{\max} = T_n \sqrt{e} = 1,65T_n, \quad (17)$$

где  $T_0^{\max}$  – максимальный период стойкости резца, мин.

Учитывая симметричность расположения кривой  $T_0 = f(V)$  в пределах изменения скорости резания от  $V_{n1}$

до  $V_n$  (см. рис. 1) и скорость  $V_0$  (16), определим скорость резания для второй точки  $B_1$  перегиба кривой:

$$V_{n1} = V_0 - (V_n - V_0) = 2V_0 - V_n = 0,6V_n. \quad (18)$$

Таким образом, вторая точка перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  имеет координаты  $B_1(V_{n1}, T_n)$  (см. рис. 1).

Разница величин скоростей резания между точками  $B$  и  $A$  и между  $A$  и  $B_1$  составляет  $\Delta V = V_n - V_0 = V_0 - V_{n1} = 0,2V_n$ . Предполагая, что изменение периода стойкости от скорости резания [9, с. 30] имеет периодический характер, можно продолжить график зависимости  $T_0 = f(V)$ . На рис. 1 зависимость показана пунктиром, что согласуется с [6, с. 173]. Тогда  $V_{n2} = 0,4V_n$ , а

Под мерой количественной оценки ресурса работы инструмента чаще всего понимается максимальная длина рабочего пути резания (ресурс работы инструмента)  $L$ , м, за период его стойкости, подсчитываемая по зависимости [5, с. 152]

$$L = VT_0. \quad (19)$$

Подставив значение  $T_0$  из (15) в (19), получим

$$L = V \frac{T_n \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2}\left(\frac{5V}{V_n}-4\right)^2}}. \quad (20)$$

Полагая, что зависимость (20) имеет максимум (см. рис. 1), для определения скорости резания, соответствующей этому максимуму, возьмем производную  $dL/dV$  и полученную функцию приравняем к нулю:

$$\frac{dL}{dV} = \sqrt{e} T_n e^{-\frac{1}{2} \left(5 \frac{V}{V_n} - 4\right)^2} \times$$

$$\times \left[ 1 - V \left(5 \frac{V}{V_n} - 4\right) \frac{5}{V_n} \right] = 0.$$

Откуда

$$1 - V \left(5 \frac{V}{V_n} - 4\right) \frac{5}{V_n} = 0$$

или

$$V^2 - \frac{4}{5} V_n V - \frac{1}{25} V_n^2 = 0.$$

Решая, получим

$$V_{mp} = \left(0,4 + \frac{1}{\sqrt{5}}\right) V_n = 0,847 V_n, \quad (21)$$

где  $V_{mp}$  – скорость резания, соответствующая максимальному ресурсу работы инструмента, м/мин.

Подставив значение скорости резания  $V_{mp}$  из (21) в (15), определим величину периода стойкости:

$$T_{0p} = 1,603 T_n. \quad (22)$$

Период стойкости соответствует максимальному ресурсу работы инструмента

$$L_p = V_{mp} T_{0p} = 1,36 V_n T_n =$$

$$= 1360 \delta_0 K_p / u_0.$$

Из сравнения скоростей  $V_0$  (16) и  $V_{mp}$  (21) видно, что скорость  $V_{mp}$ , соответствующая максимальному ресурсу работы инструмента  $T_{0p}$  (22), больше скорости  $V_0$ , соответствующей максимальному периоду его стойкости  $T_0^{max}$  (17). Однако период стойкости  $T_0^{max}$  больше периода стойкости  $T_{0p}$ . Разница скоростей  $(V_{mp} - V_0)$  и периодов стойкости  $(T_0^{max} - T_{0p})$  почти одинаковая и составляет 4,7 % от соответствующих величин  $V_n$  и  $T_n$  (табл. 1). Максимум  $T_{0p}$  от скорости резания смещен вправо относительно максимума  $T_0^{max}$ , а  $T_{0p} < T_0^{max}$ . Однако ресурс работы резца при  $V = V_{mp}$  больше ресурса работы резца при  $V = V_0$  (см. табл. 1).

Табл. 1. Изменение ресурса работы инструмента  $L / L_n$  и показателя степени  $n_0$  интенсивности изнашивания лезвия от скорости резания

$V, \text{ м/мин}$	$V_{n1}$	$V_1$	$V_0$	$V_{mp}$	$V_n$	$V_{r1}$	$V_{r2}$	$V_m$	$V_{n2}$
$\frac{V}{V_n}$	0,6	0,7	0,8	0,847	1,0	1,2	1,4	0,4	0,2
$\frac{T_0}{T_n}$	1,0	1,455	1,65	1,603	1,0	0,4	0,186	0,35	1,0
$\frac{L}{L_n} = \frac{V T_0}{V_n T_n}$	0,6	1,02	1,32	1,358	1,0	0,48	0,26	0,14	0,2
$n_0$	0,43	1,0	1,59	1,67	1,0	0,294	0,106	0,174	0,068

Подставив значение скорости резания и соответствующее ей значение стойкости в выражение (2), получим величину показателя  $n_0$  интенсивности изнашивания

лезвия (см. табл. 1). Изменение показателя степени  $n_0$ , зависящее от скорости резания, идентично изменению ресурса работы инструмента (см. рис. 1, б).

Согласно табл. 1, максимальный ресурс работы лезвийного инструмента при скорости резания  $V_{mp}$  (21), превышает на 2,9 % ресурс работы инструмента, соответствующий скорости резания  $V = V_0$ .

При увеличении скорости резания от  $V_{n1}$  до  $V_n$  показатель степени  $n_0$  увеличивается от  $n_0 = 0,43$  в точке  $B_1$  кривой  $T_0 = f(V)$  до  $n_0 = 1,67$  (до максимального значения) в точке  $A_0$  (см. рис. 1, б), а затем уменьшается до  $n_0 < 1,0$ , выравниваясь до единицы при скоростях резания  $V = V_1$  и  $V = V_n$ . Величина скорости  $V_1$  находится между скоростями  $V_{n1}$  и  $V_0$  и ориентировочно равна среднему арифметическому значению этих скоростей:

$$V_1 = \frac{1}{2}(V_{n1} + V_0) = \frac{1}{2}(0,6V_n + 0,8V_n) = 0,7V_n. \quad (23)$$

Точное решение для скорости  $V_1$  можно получить из (2) при условии  $n_0 = 1,0$ .

Тогда из (2) и (9) имеем

$$V_1 T_1 = \frac{1000 \delta_0 K_p}{u_0} = T_n V_n. \quad (24)$$

С учетом (15) и (19) можно записать

$$V_1 \frac{T_n \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( \frac{5V_1}{V_n} - 4 \right)^2}} = T_n V_n$$

или

$$\frac{V_1}{V_n} \sqrt{e} = e^{\frac{1}{2} \left( \frac{5V_1}{V_n} - 4 \right)^2}. \quad (25)$$

Разложив правую часть выражения (25) в ряд и приняв во внимание

только два члена разложения, имеем

$$V^2 - \frac{2}{25} V_n (20 + \sqrt{e}) V + \frac{18}{25} V_n^2 = 0. \quad (26)$$

Решив уравнение (26), найдем значение скорости:  $V_1 = 0,693V_n \approx 0,7V_n$ .

Подставив значение скорости  $V_1$  в выражение (15), получим

$$T_{01} = 1,455T_n. \quad (27)$$

Согласно зависимости (2), при  $n_0 = 1,0$  для точек  $B$  и  $A_1$  (см. рис. 1) имеем  $T_n V_n = T_1 V_1$ . Влияние глубины резания  $t$  и подачи  $S$  на стойкость и ресурс работы инструмента связано с величиной параметра  $C$  (11), который при изменении глубины резания, например, от 0,2 до 3 мм, уменьшается на 33 %, а с увеличением подачи, например, от 0,2 до 1 мм/об, уменьшается на 41 % (табл. 2).

Это приводит при изменении глубины резания в указанных пределах к уменьшению величины скорости резания  $V_n$  от 257 до 154 м/мин, т. е. на 40 %, и к увеличению периода стойкости  $T_n$  от 52 до 88 мин, т. е. в 1,7 раза (рис. 2). При изменении подачи в указанных пределах это приводит к уменьшению скорости резания  $V_n$  от 275 до 141 м/мин, т. е. на 49 %, и к увеличению периода стойкости  $T_n$  от 49 до 96 мин, т. е. примерно в 2 раза (см. рис. 2).

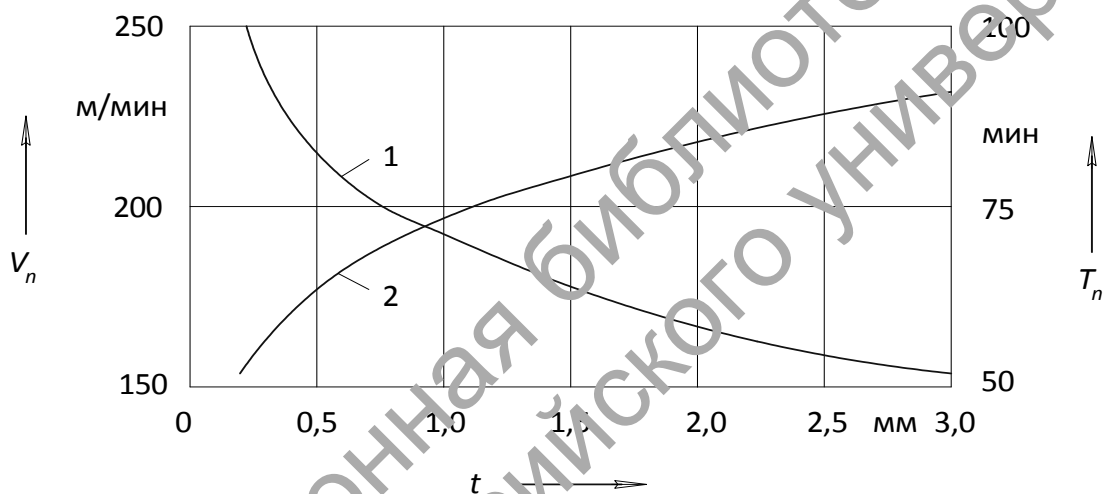
Скорость резания  $V_0$  (16) и период стойкости  $T_0^{\max}$  (17), связанные со значением скорости  $V_n$  и периодом стойкости  $T_n$ , от глубины резания  $t$  и подачи  $S$  изменяются аналогично скорости  $V_n$  и периоду  $T_n$  (рис. 3). Так, при увеличении глубины резания  $t$  от 0,2 мм до 3 м расчетная величина скорости резания  $V_0$  уменьшается от 205 до 123 м/мин, т. е. на 40 %.

Табл. 2. Значение параметра  $C$  для соответствующих режимов обработки [3]

Подача $S$ , мм/об	Глубина резания $t$ , мм								
	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,2	738	694	643	600	579	545	522	505	491
0,3	680	640	593	553	534	503	482	466	453
0,5	568	534	495	461	446	420	402	389	378
0,8	479	450	417	389	376	354	338	328	319
1,0	433	407	377	352	340	320	306	296	288

Примечание -  $C_V = 420; 350; 340$ ;  $y = 0,2; 0,35; 0,45$ ;  $x = 0,15$ ;  $K_V = 1,0$

а)



б)

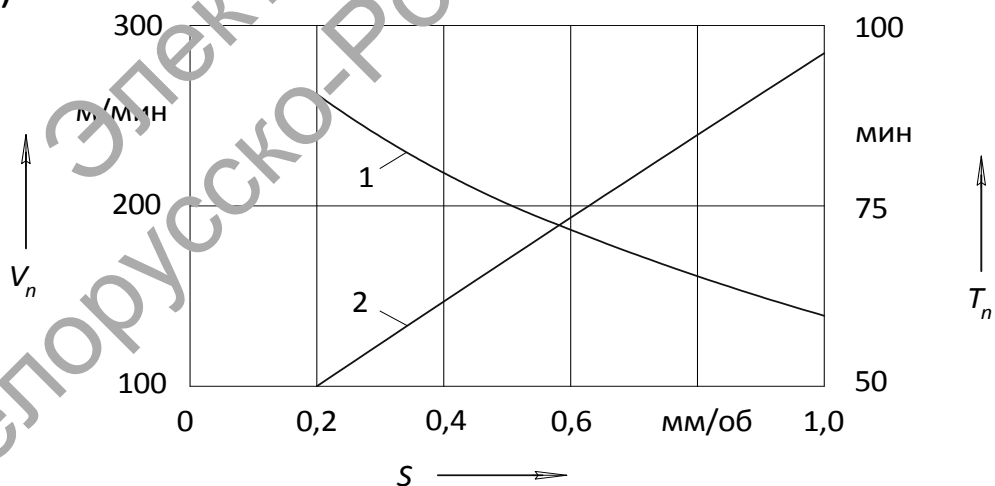
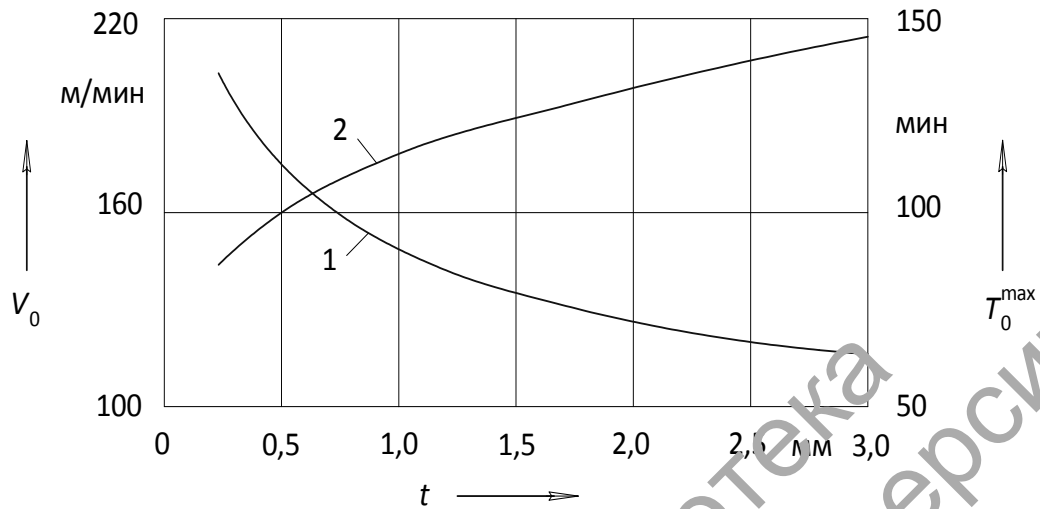


Рис. 2. Изменение скорости  $V_n$  (1) и периода стойкости  $T_n$  (2) от глубины резания  $t$  (а) и подачи  $S$  (б): а -  $S = 0,5$  мм; б -  $t = 0,8$  мм

а)



б)

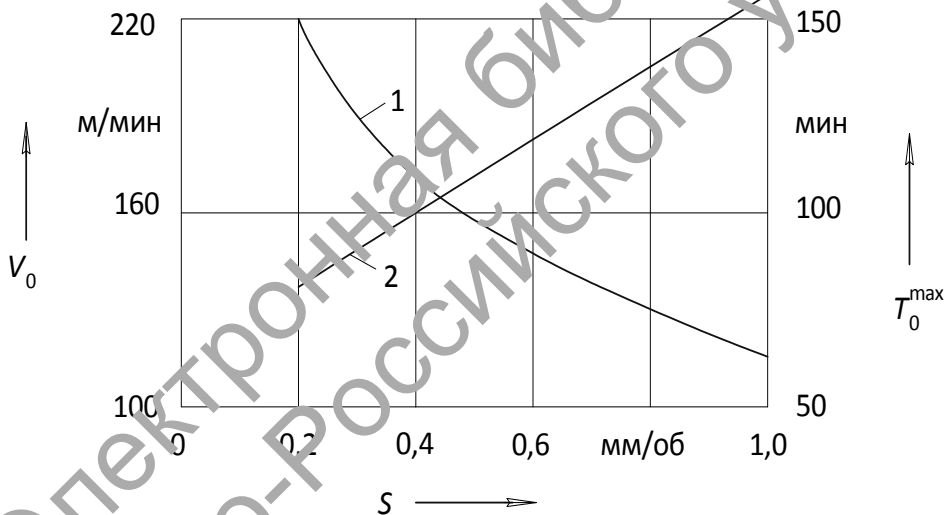


Рис. 3. Изменение скорости  $V_0$  (1) и периода стойкости  $T_0^{\max}$  (2) от глубины резания  $t$  (а) и подачи  $S$  (б): а -  $S = 0,5$  мм; б -  $t = 0,8$  мм

Период стойкости  $T_0^{\max}$  при этом увеличивается от 87 до 145 мин, т. е. в 1,67 раза. При увеличении подачи  $S$  от 0,2 до 1,0 мм/об скорость резания  $V_0$  уменьшается от 220 до 113 м/мин, т. е. на 49 %. При этом период стойкости  $T_0^{\max}$  увеличивается от 81 до 158 мин, т. е. в 1,95 раз (см. рис. 3). Это связано с уменьшением скорости резания и удельного расхода энергии на снятие

срезаемого слоя большей площади сечения [7, с. 50].

Таким образом, величину глубины резания и величину подачи необходимо назначать максимально возможными, чтобы уменьшить скорость резания  $V_n$  в точке  $B$  перегиба кривой  $T_0 = f(V)$  и тем самым увеличить период стойкости  $T_n$  и, соответственно, ресурс работы инструмента. Скорость



резания должна назначаться равной скорости резания  $V_{mr}$ , соответствующей максимальному ресурсу работы ин-

струмента, что обеспечит большую производительность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шатуров, Г. Ф.** Исследование процесса изнашивания токарного инструмента / Г. Ф. Шатуров, В. А. Лукашенко, Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 113–118.
2. **Шатуров, Г. Ф.** Исследование закономерностей изнашивания токарных резцов / Г. Ф. Шатуров, Д. Г. Шатуров // Науч. тр. Могилевского филиала БИП. – 2006. – Вып. 1. – С. 121–126.
3. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1–2.
4. **Шатуров, Д. Г.** Оценка стойкости лезвийного инструмента / Д. Г. Шатуров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 55.
5. **Грановский, Г. И.** Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Вып. шк., 1990. – 512 с.
6. **Кожевников, Д. В.** Резание материалов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников, С. Б. Кирсанов ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – 2-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 2012. – 304 с.
7. **Подураев, В. Н.** Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1977. – 304 с.
8. **Шатуров, Д. Г.** Обеспечение геометрических характеристик поверхностей валов на основе прогнозирования износа резцов и жесткости технологической системы : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. Г. Шатуров. – Могилев, 2015. – 32 с.
9. **Аваков, А. А.** Физические основы теории стойкости режущих инструментов / А. А. Аваков. – М. : Машгиз, 1960. – 308 с.
10. **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.

Статья сдана в редакцию 15 сентября 2016 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.

**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.