

УДК 621.9

Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

UDC 621.9

D. G. Shaturov, V. K. Sheleg

RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED ON THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF TURNING WITH A CEMENTED CARBIDE TOOL

Аннотация

Приведена методика определения триботехнических характеристик процесса точения с учетом изменения скорости резания и температуры в зоне резания. Получены зависимости, позволяющие определить скорость резания при переходе от абразивно-адгезионного вида износа к абразивно-окислительному.

Ключевые слова:

обработка, резец, стойкость, скорость резания, период стойкости.

Abstract

The technique for determining tribotechnical characteristics of the turning process is given, which takes into account changes in cutting speed and temperature in the cutting zone. Dependencies have been obtained that make it possible to determine the cutting speed during the transition from an abrasive-adhesive type of wear to an abrasive-oxidative one.

Keywords:

processing, cutter, durability, cutting speed, durability period.

При проектировании технологического процесса лезвийной обработки поверхностей первостепенная задача состоит в обеспечении их качества, под которой понимается, прежде всего, точность получения заданных чертежом размеров и необходимая величина шероховатости обрабатываемой поверхности при наименьших производственных затратах. Все эти требования зависят от режимов резания и износостойкости участка режущей кромки (РК) или лезвия, формообразующих обрабатываемую поверхность. Изменение размеров формообразующего участка РК в большей степени зависит от температуры в зоне резания, величина которой влияет

на триботехнические характеристики изнашиваемых поверхностей. Триботехнические характеристики можно оценить таким параметром, как ресурс работы инструмента, равный произведению скорости резания на период его стойкости, показывающий максимальный путь резания в метрах до его затупления [1, 2]:

$$L = VT_0, \quad (1)$$

где V – скорость резания, м/мин; T_0 – период стойкости инструмента, мин.

Чем больше ресурс работы инструмента, тем меньше скорость его изнашивания, тем более точно можно из-



готовить деталь, тем меньше переналадок резца на размер, тем больше будет производительность.

При обработке углеродистых конструкционных сталей можно установить несколько зон или участков по скорости резания, отличающихся между собой видами износа поверхностей инструмента. Всего таких четыре зоны (рис. 1). *Первая зона* – это зона скоростей резания до $V_{пз}$ механического износа поверхностей инструмента, при которой отсутствует нарост на передней его поверхности. *Вторая зона* – это зона от скорости резания $V_{пз}$ до скорости V_m при наличии нароста на передней поверхности инструмента и абразивно-адгезионного вида износа его рабочих поверхностей. *Третья зона* – это зона скоростей резания от V_m до V_n , связана с абразивно-окислительным видом износа поверхностей инструмента. *Четвертая зона* – это зона диффузионного износа поверхностей инструмента, имеет место при скорости резания больше скорости

резания V_n в точке B перегиба кривой $T_0 = f(v)$.

Расположение зон и их величина по скорости резания связаны с температурой в зоне резания, которая увеличивается при увеличении скорости резания. Температура определяет физическое состояние и триботехнические характеристики в зоне контакта изнашиваемых рабочих поверхностей инструмента со сходящей стружкой и с поверхностью резания обрабатываемой детали. При увеличении скорости резания и температуры имеет место неравномерная интенсивность изнашивания рабочих поверхностей инструмента. Так, период стойкости инструмента при изменении скорости резания имеет два экстремума, расположенных на двух уровнях по стойкости и на разных скоростях резания, образованных при разных температурах в зоне резания, между которыми расположена впадина (см. рис. 1) [1, 3].

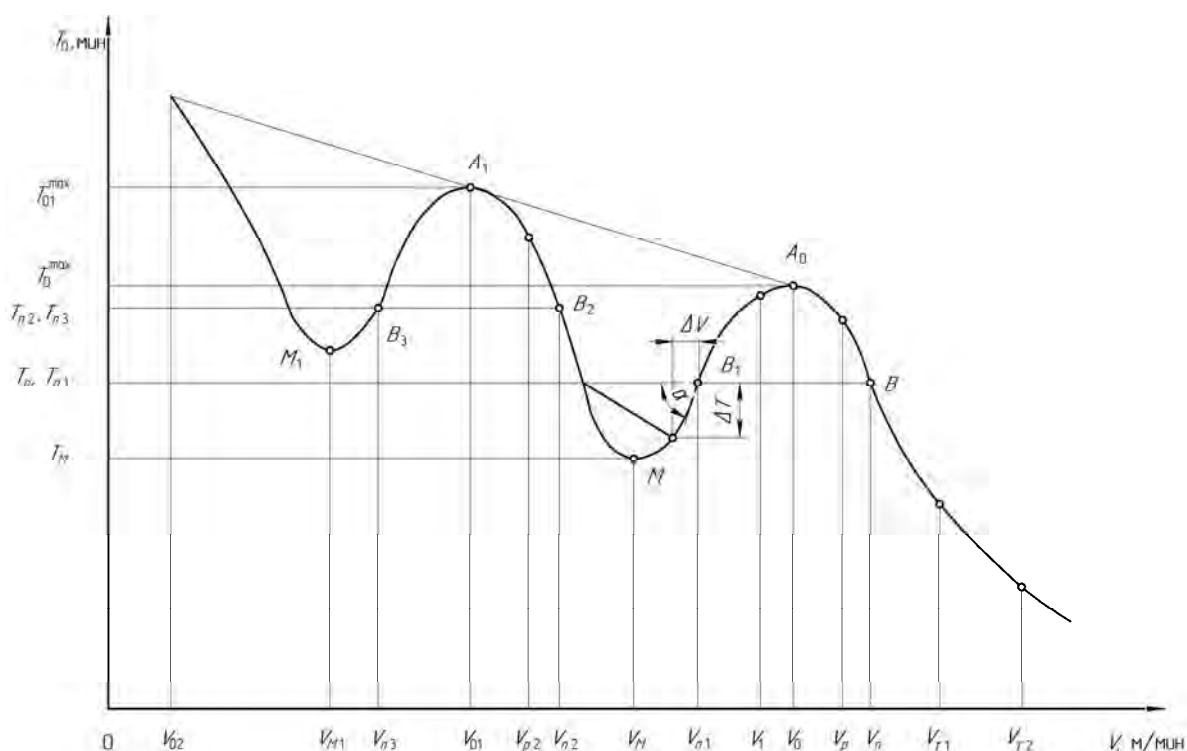


Рис. 1. Зависимость периода стойкости от скорости резания



Интервал скоростей резания впадины от скорости V_{01} до V_0 (см. рис. 1) мало изучен и совместно с другими участками скорости резания, примыкающими к нему, определяет актуальность настоящих исследований. Экстремум по периоду стойкости от скорости резания образуется, когда между рабочими поверхностями инструмента, с одной стороны, стружкой и поверхностью резания, с другой стороны, образуется промежуточное третье тело, которое защищает их от непосредственного с ними контакта. В результате стойкость инструмента увеличивается. Так, образование первого экстремума по периоду стойкости связано с явлением наростообразования на передней поверхности резца и абразивно-адгезионным видом износа его рабочих поверхностей. Максимальное значение периода стойкости зоны наростообразования имеет место в диапазоне скоростей резания от 10 до 80 м/мин в зависимости от обрабатываемого материала [5]. В диапазоне этих скоростей резания при температуре резания, равной 300 °С, на передней поверхности образуется максимальной высоты нарост, повышенной в 2,5–3 раза твердости по отношению к обрабатываемому материалу [5, 7], который выполняет функции нового резца. Период стойкости для этого диапазона скоростей резания от $V_{пз}$ до V_m определяется из выражения [3]

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

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

$$T_{01}^{\max} = T_{n2} \sqrt{e}; \quad (3)$$

V_{n2} , T_{n2} – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, резца в точке B_2 перегиба ($n_{01} = 1,0$) кривой $T_0 = f(v)$;

V_{01} – скорость резания, м/мкм.

Второй экстремум образуется при скорости резания $V > V_m$, где V_m – скорость резания, соответствующая минимальному периоду стойкости резца впадины (см. рис.1). При скорости резания V_m и температуре резания, равной 600 °С, отсутствует нарост на передней поверхности инструмента [5, 7], а на рабочих поверхностях резца начинает образовываться от действия кислорода (воздуха) окисная пленка, защищающая их от непосредственного контакта со сходящей стружкой и поверхностью резания. Вследствие этого при увеличении скорости резания больше V_m наступает период абразивно-окислительного вида износа рабочих поверхностей инструмента, где окисление, т. е. восстановление местами разрушенной от износа пленки, является преобладающим, и стойкость резца до скорости резания V_0 увеличивается (см. рис. 1). Для этого диапазона скоростей резания, от скорости V_m до V_n , предлагается следующая зависимость для определения периода стойкости [1, 3]:

$$T_0 = \frac{T_0^{\max}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{5V}{V_n} - 4 \right)^2}}, \quad (4)$$

где

$$V_n = C^{1,25} \left(\frac{U_0}{1000 \delta_0 K_p} \right)^{0,25}; \quad (5)$$

$$C = \frac{C_V K_V}{t^x S^y}; \quad (6)$$

$$T_0^{\max} = T_n \sqrt{e}; \quad (7)$$

$$T_n = \frac{1000 \delta_0 K_p}{V_n U_0}; \quad (8)$$

T_0^{\max} – максимальный период стойкости, соответствующий второму экстремуму периода стойкости кривой



$T_0 = f(v)$, мин; V_n, T_n – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, инструмента в точке B перегиба кривой $T_0 = f(v)$; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; δ_0 – оптимальная величина износа задней поверхности резца, мкм; K_p – коэффициент перевода величины линейного износа задней поверхности в радиальный (размерный), $K_p \approx \operatorname{tg} \alpha_3$ (α_3 – задний угол заточки резца); U_0 – величина относительного размерного износа лезвия резца, $U_0 = 5 \dots 7$ мкм/км при обработке стали резцом Т15К6 [6]; C_v, K_v, x, y – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [6].

Из рис. 1

$$V_0 = 0,8V_n; \quad (9)$$

$$V_{n1} = 0,6V_n; \quad (10)$$

$$V_p = 0,847V_n; \quad (11)$$

$$T_p = 1,603T_n; \quad (12)$$

где V_0 – скорость резания, соответствующая второму экстремуму периода стойкости кривой $T_0 = f(v)$, м/мин; V_p, T_p – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, максимального ресурса работы инструмента; V_{n1} – скорость резания, м/мин, соответствующая второй точке перегиба кривой $T_0 = f(v)$.

Для четвертого диапазона скоростей резания, больших V_n , предлагается следующая зависимость для определения периода стойкости [1]:

$$T_0 = T_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^5. \quad (13)$$

Для определения скоростей резания V_{01}, V_{n2}, V_m и периода стойкости T_{n2} воспользуемся результатами работы [3], в которой отмечается, что оптимальная скорость резания должна быть такой, при которой в тонком (5...10 А) кон-

тактном слое стружки с передней поверхностью резца обеспечивается кристаллизация в нем фазы аустенита. Эта оптимальная температура зависит от содержания углерода в сплаве и определяется по диаграмме «железо – углерод» из следующих зависимостей [3]:

– при $C \leq 0,8 \% C$

$$\Theta_0 \geq 911 + 120 C^2 - 326 C; \quad (14)$$

– при $C \geq 0,8 \% C$

$$\Theta_0 \geq 474 + 313 C, \quad (15)$$

где Θ_0 – оптимальная температура резания, °С; C – процентное содержание углерода в сплаве.

Тогда температуру резания при любой скорости резания можно определить, используя следующие формулы:

$$\Theta_V = \Theta_n + (\Theta_0 - \Theta_n) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{x_v}; \quad (16)$$

$$X_v = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg V_0}, \quad (17)$$

где Θ_V – температура резания при скорости резания V , °С; Θ_n – температура резания в начале обработки, $\Theta_n = 20 \dots 25$ °С; V_0 – скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента второго экстремума.

Из зависимостей (16) и (17) определяется скорость резания при заданной температуре резания [3] по формуле

$$V = V_0 \left(\frac{\Theta_V - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{x_v}}. \quad (18)$$

Так, для скоростей резания V_{01} и V_m температура резания соответственно равна 300 и 600 °С [5, 7], а температура резания для скорости V_{n2} можно предположить как среднюю температуру от



этих температур ($\Theta_{n2} = 450 \dots 460 \text{ }^\circ\text{C}$).

Тогда скорости резания определяются из следующих зависимостей [3]:

$$V_{01} = V_0 \left(\frac{300 - \Theta_H}{\Theta_0 - \Theta_H} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (19)$$

$$V_{n2} = V_0 \left(\frac{450 - \Theta_H}{\Theta_0 - \Theta_H} \right)^{\frac{1}{X_V}}; \quad (20)$$

$$V_M = V_0 \left(\frac{600 - \Theta_H}{\Theta_0 - \Theta_H} \right)^{\frac{1}{X_V}}. \quad (21)$$

Определим скорость резания максимального ресурса работы инструмента $L_1 = VT_{01}$ зоны наростообразования. Для этого с использованием зависимостей (1) и (2) возьмем производную dL_1/dV и полученную функцию приравняем к нулю.

$$\frac{dL_1}{dV} = \frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}} \times \left[1 - \left(\frac{V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2 \left(\frac{V}{V_{01}} - 1 \right) \frac{V}{V_{01}} \right].$$

Откуда получаем уравнение

$$V^2 - V V_{01} - (V_{n2} - V_{01})^2 = 0. \quad (22)$$

После решения имеем

$$V_{p1} = \frac{1}{2} V_{01} \left[1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{V_{n2}}{V_{01}} - 1 \right)^2} \right], \quad (23)$$

где V_{p1} – скорость резания, соответствующая наибольшему ресурсу работы инструмента зоны наростообразования.

Далее произведем некоторый анализ скоростей резания впадины. Левая сторона впадины или правая ветвь кри-

вой периода стойкости $T_{01} = f(v)$ формируется при абразивно-адгезионном виде износа рабочих поверхностей инструмента. При увеличении скорости резания больше V_{n2} стойкость резца значительно уменьшается, а шероховатость обработанной поверхности увеличивается из-за отрыва твердых частиц нестабильного нароста и их перемещения на заднюю поверхность инструмента и обработанную поверхность с формированием на них углублений. Правая сторона впадины или левая ветвь кривой периода стойкости от скорости резания $T_0 = f(v)$ формируется при наличии на изнашиваемых поверхностях окисной пленки и абразивно-окислительного вида износа поверхностей инструмента. Поэтому увеличение скорости резания, большей скорости V_M , приводит к увеличению стойкости резца и уменьшению шероховатости обработанной поверхности. В силу этих причин заманчиво и целесообразно при скорости резания, большей V_{n2} , перейти на скорость резания $V > V_M$ с целью замены абразивно-адгезионного вида износа на абразивно-окислительный, где окисление, т. е. восстановление окисной пленки, является преобладающим.

Минимальная скорость резания для этого перехода определяется из соотношения $T_{01} = f(v) \geq T_n$:

$$\frac{T_{n2} \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{V_{\alpha 1} - V_{01}}{V_{n2} - V_{01}} \right)^2}} \geq T_n, \quad (24)$$

где $V_{\alpha 1}$ – скорость резания левой стороны впадины при стойкости T_n .

После решения зависимости (24) получим

$$V_{\alpha 1} \leq V_{01} + (V_{n2} - V_{01}) \sqrt{2 \frac{\lg(T_{n2} \sqrt{e} / T_n)}{\lg e}}. \quad (25)$$

Тогда ресурс работы инструмента при скорости $V_{\alpha 1}$ находим как

$$L_{1\alpha} = V_{\alpha 1} T_n. \quad (26)$$

Определим минимальную скорость резания V_α правой стороны впадины левого участка кривой $T_0 = f(v)$, которая при переходе от скорости $V_{\alpha 1}$ к скорости V_α обеспечит равный или больший ресурс работы инструмента по сравнению с ресурсом $L_{1\alpha}$. Скорость V_α находим из сравнения ресурсов:

$$L = V_\alpha T_\alpha \geq L_{1\alpha} = V_{\alpha 1} T_n. \quad (27)$$

Тогда из рис. 1

$$V_{\alpha 1} T_n \leq (V_{n1} - \Delta V) (T_n - \Delta T), \quad (28)$$

где

$$\Delta T = \Delta V \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 5 \frac{T_n}{V_n}.$$

После решения получим

$$\Delta V = 0,4 V_n \left(1 - \sqrt{0,25 + 1,25 \frac{V_{\alpha 1}}{V_n}} \right). \quad (29)$$

Скорость резания правой стороны впадины

$$\begin{aligned} V_\alpha &= V_{n1} - \Delta V = \\ &= 0,2 V_n \left(1 + 2 \sqrt{0,25 + 1,25 \frac{V_{\alpha 1}}{V_n}} \right). \quad (30) \end{aligned}$$

В зависимость (25) входит такой параметр, как период стойкости T_{n2} .

Предполагая симметричность расположения скоростей резания $V_{\alpha 1}$ и V_{n1} впадины относительно скорости резания V_m , можно записать

$$V_{\alpha 1} = 2V_m - V_{n1};$$

$$T_{n2} = T_n + (V_{\alpha 1} - V_{n2}) \operatorname{tg} \alpha. \quad (31)$$

После преобразования получим выражение для определения периода стойкости резца при скорости резания V_{n2} в точке B_2 перегиба кривой $T_{01} = f(v)$:

$$T_{n2} = T_n \left(1 + 5 \frac{2V_m - V_{n1} - V_{n2}}{V_n} \right). \quad (32)$$

Можно предложить и другую зависимость по определению периода стойкости

$$T_{n2} = T_m + (T_n - T_m) \frac{V_m - V_{n2}}{V_{n1} - V_m}. \quad (33)$$

Для точек B и B_2 перегиба кривых $T_0 = f(v)$ и $T_{01} = f(v)$, где интенсивность износа равномерная ($n_0 = 1$) [4], $T_n V_n U_0 = T_{n2} V_{n2} U_{01}$.

Откуда

$$U_{01} = \frac{T_n V_n U_0}{T_{n2} V_{n2}}, \quad (34)$$

где U_{01} – величина относительного размерного износа лезвия в зоне скоростей наростообразования, мкм/км.

При известности максимального периода стойкости T_0^{\max} можно определить величину температуры резания от времени обработки Θ_τ , °С, по формуле

$$\Theta_\tau = \Theta_n + (\Theta_0 - \Theta_n) \left(\frac{\tau}{T_0^{\max}} \right)^{n_1}, \quad (35)$$

где τ – время резания, мин;

$$n_1 = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg T_0^{\max}}. \quad (36)$$

Из выражения (36) легко находится время стабилизации температуры в



зоне резания и величина температуры в момент ее стабилизации:

$$\tau_{n\Theta} = T_0^{\max} n_1^{\frac{1}{1-n_1}}; \quad (37)$$

$$\Theta_{n\Theta} = (\Theta_0 - \Theta_n) n_1^{\frac{n_1}{1-n_1}}. \quad (38)$$

Для оценки триботехнических параметров процесса резания можно, используя [4], определить величины износов задней поверхности резца от времени резания для второй $T_{01} = f(v)$ и для третьей $T_0 = f(v)$ зон скоростей резания (табл. 1):

$$h_{z1} = a_{c1} \tau^{n_{01}} = \frac{\delta_0}{T_{01}^{n_{01}}} \tau^{n_{01}}; \quad (39)$$

$$h_z = a_c \tau^{n_0} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau^{n_0}; \quad (40)$$

$$n_{01} = \left[\frac{T_{01} V U_{01}}{1000 \delta_0 K_p} \right]^{1,67}; \quad (41)$$

$$n_0 = \left[\frac{T_0 V U_0}{1000 \delta_0 K_p} \right]^{1,67}. \quad (42)$$

С учетом полученных значений n_{01} и n_0 , периодов стойкости T_{01} и T_0 легко определяются [4] такие параметры процесса, как время приработки τ_{n_1} и τ_n , время установившегося износа τ_{n_1} и τ_n , величина износа задней поверхности резца δ_{n1} и δ_n , средние скорости изнашивания V_{1uz} и V_{2uz} за эти периоды и скорости V_{01uz} и V_{0uz} изнашивания за весь период стойкости инструмента для второго $T_{01} = f(v)$ и третьего $T_0 = f(v)$ диапазона скоростей резания.

В табл. 1 представлены результаты расчетов всех триботехнических пара-

метров процесса резания стали 45 резцом T15K6 на режимах $t = 1$ мм; $S = 0,24$ мм/об.

Заключение

1. Разработана общая методика определения триботехнических параметров процесса резания твердосплавным инструментом: периодов стойкости инструментов, величины износа лезвия от времени резания, ресурса работы инструментов, показателя степени n_{01} и величины относительного размерного износа U_{01} для кривой $T_{01} = f(v)$, средней температуры резания.

2. Получены зависимости для определения скоростей резания при переходе от абразивно-адгезионного к абразивно-окислительному виду износа.



Табл. 1. Триботехнические параметры процесса резания (резец Т15К6; материал сталь 45; $K_p = 0,167$; $K_v = 0,9$; $X = 0,15$; $Y = 0,2$; $C = 503$)

	$V_{пз}$	V_{01}	V_{11}	V_{p1}	V_{n2}	V_{a1}	$V_{сr}$	V_a	V_{n1}	V_1	V_0	V_p	V_n	V_2	V_3
9,2 мкм/км															
U_0															
$n_{от}$	0,025	0,87	1,0	1,22	1,0	0,614	0,494								
n_0							0,178	0,222	0,425	1,0	1,575	1,655	1,0	0,572	0,077
$a_{с1}$	442	4,58	2,29	0,851	3,79	32,7	67,9								
a_c							243	199,3	75,7	4,03	0,21	0,147	5,88	49,5	406
$L_1, м$	1056	8800	9592	10788	9504	7140	6270								
$L_2, м$							6270	7144	10540	17980	23100	23800	17595	12597	3795
$\Theta_v, ^\circ C$	108	300	320	387	449	500	602	615	655	731	800	834	939	983	1082
$\tau_n, мин$	3,0	75,4	80	75	48,5	24	14								
							7,0	9	19	47	64	63	32	16	0,9
$\tau_n, мин$	129	145	139	111	84	61	43								
							50	54	66	77	76	73	53	41	14
$\delta_n, мкм$	455	197	184	166	184	230	251								
							344	325	266	188	144	140	188	237	404
$\delta_n, мкм$	45	303	316	334	316	270	249								
							156	175	234	312	356	360	312	263	96
$V_{фаз}, мкм/мин$	3,79	2,27	2,29	2,69	3,79	5,88	8,77								
							8,77	7,94	5,88	4,03	3,57	3,68	5,88	8,77	33,3
$V_{гав}, мкм/мин$	151	2,61	2,29	2,2	3,79	9,58	17,8								
							49,3	35,75	13,84	4,03	2,27	2,22	5,88	15,3	433
$V_{зав}, мкм/мин$	4,14	2,1	2,29	3,0	3,79	4,39	5,75								
							3,11	3,22	3,52	4,03	4,69	4,97	5,86	6,27	7,16

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шелег, В. К.** Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов / В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.
2. **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.
3. **Шатуров, Д. Г.** Исследование режущей способности твердосплавного лезвийного инструмента при средних скоростях резания / Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 112–120.
4. **Шатуров, Д. Г.** Технологические особенности чистой токарной обработки валов / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 192 с.
5. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 495 с.
7. **Кожевников, Д. В.** Резание металлов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
8. **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 30 марта 2020 года

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

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: Sheleh V@tut.by.

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

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University. E-mail: ShelehV@tut.by.