

---

УДК 621.9

*Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег*

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА  
ОБРАЗОВАНИЯ НАРОСТА НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

---

UDC 621.9

*D. G. Shaturov, V. K. Sheleg*

---

**PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL BASICS OF THE PROCESS OF BUILDUP  
FORMATION ON THE FRONT SURFACE OF A CARBIDE-TIPPED TOOL**

---

**Аннотация**

В работе рассмотрены периоды роста, стабилизации, уменьшения и схода нароста с передней поверхности твердосплавного лезвийного инструмента.

Показано, что чередование этих периодов связано с теплофизическими характеристиками компонентов состава твердого сплава инструмента, изменяющимися от температуры при увеличении скорости резания. Установлены границы периодов изменения состояния нароста по скорости резания, температуре и стойкости инструмента. Предложена конструкция инструмента с микрорельефом на его передней поверхности, обеспечивающая сокращение диапазона скоростей резания с минимальной стойкостью инструмента, повышение периода стойкости и производительности на 60 %.

**Ключевые слова:**

резец, скорость резания, стойкость инструмента, нарост, микрорельеф, температура.

**Abstract**

The paper considers the periods of growth, stabilization, reduction and disappearance of the buildup from the front surface of a carbide-tipped tool.

The interchange of these periods is shown to be associated with thermophysical characteristics of components of the carbide material composition, which change due to temperature when the cutting speed increases. The boundaries of periods of build-up changing have been established in regard to cutting speed, temperature and tool durability. The design of a tool is proposed, which has a microrelief on its front surface providing a reduction in the range of cutting speeds with a minimum tool life, and a 60 % increase in the tool life and productivity.

**Keywords:**

cutter, cutting speed, tool life, buildup, microrelief, temperature.

---

В теории резания износу твердосплавного инструмента посвящено много работ [1–3], в которых в основном рассматриваются вопросы их изнашивания при повышенных скоростях резания [4, 5]. Однако работ, посвященных износу твердосплавного инструмента при малых и средних скоростях резания, недостаточно мало [5, 6]. Это сдерживает оптимизацию режимов резания при работе на этих скоростях резания при

точении, растачивании, зенкерования, фрезеровании и т. д. Задачей данной работы является устранить этот пробел.

Износ твердосплавного инструмента при малых и средних скоростях резания от 10 до 80 м/мин связан с явлением наростообразования по его передней поверхности [2, 5].

Период стойкости инструмента в этом диапазоне скоростей резания изменяется по кривой, определяемой из сле-

дующего выражения (рис. 1, табл. 1) [7]:

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

где  $V_{01}$ ,  $T_{01}^{\max}$  – скорость резания, м/мин, и соответствующий ей макси-

мальный период стойкости, мин, в точке  $A_1$  (см. рис. 1),

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

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

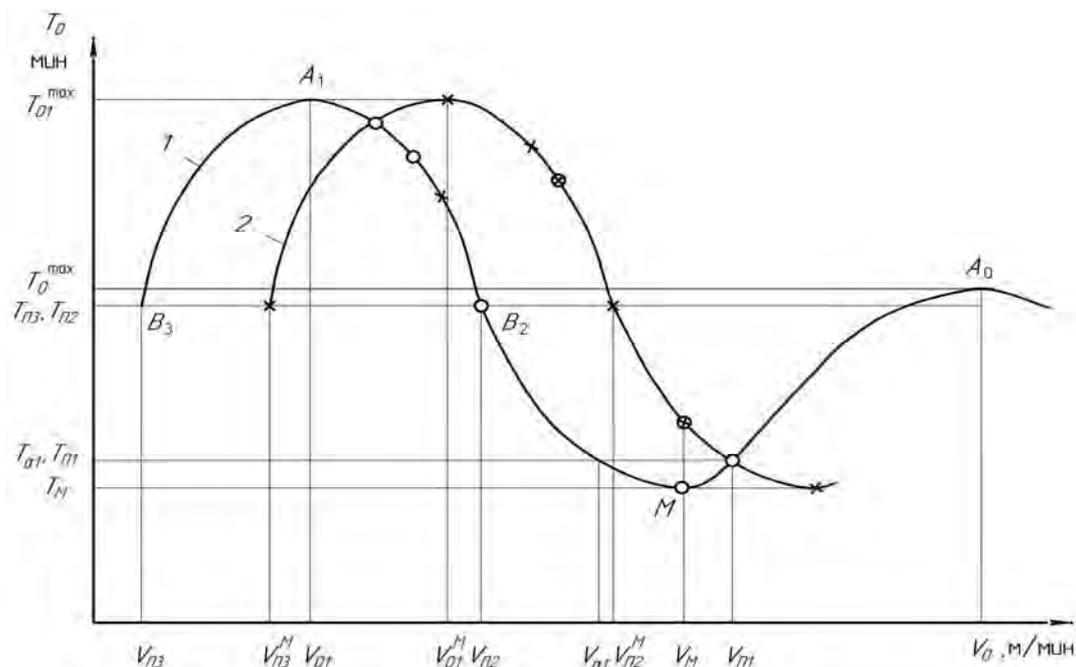


Рис. 1. Зависимость периода стойкости резца от скорости резания: 1 – без рельефа,  $b = 0$  мм; 2 – с рельефом на передней поверхности,  $b = 1,2$  мм

Табл. 1. Значения периодов стойкости резца от скорости резания

| Параметры        | $V_{n3}$ ,<br>м/мин | $V_{01}$ ,<br>м/мин | $V_{n2}$ ,<br>м/мин | $V_{a1}$ ,<br>м/мин | $V_{n}$ ,<br>м/мин | $V_{n1}$ ,<br>м/мин | $V_0$ ,<br>м/мин | $V_n$ ,<br>м/мин | $V_s$ ,<br>м/мин | Рельеф                       |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|
|                  | 8                   | 40                  | 72                  | 84                  | 110                | 124                 | 165              | 207              | 221              |                              |
| $T_{01}$ , мин   | 132                 | 220                 | 132                 | 85                  | 57                 |                     |                  |                  |                  | $b = 0$<br>$h = 0$           |
| $T_0$ , мин      |                     |                     |                     |                     | 57                 | 85                  | 140              | 85               | 57               |                              |
| $V_M$ , м/мин    | 33                  | 65                  | 97                  |                     | 110                |                     |                  |                  |                  | $b = 1,2$ мм<br>$h = 0,6$ мм |
| $T_{01}^M$ , мин | 132                 | 220                 | 71                  |                     | 85                 |                     |                  |                  |                  |                              |

Примечание –  $t = 1$  мм;  $S = 0,24$  мм/об; резец Т15К6; материал – сталь 45;  $V_M$  – скорость резания;  $T_{01}^M$  – период стойкости резца с микрорельефом [8]

Кроме указанных скоростей резания  $V_{n2}$  и  $V_{01}$  в точках  $B_2 (V_{n2}, T_{n2})$  и  $A_1 (V_{01}, T_{01}^{\max})$  кривой  $T_{01} = f(v)$  (см. рис. 1), необходимо отметить еще две характерные точки. Это  $B_2 (V_{n3}, T_{n3})$  и  $M (V_m, T_m)$ , в которых при скорости  $V_{n3}$  начинается, а при скорости  $V_m$  заканчивается процесс наростообразования на передней поверхности резца.

На участке скоростей резания от  $V_{n3}$  до  $V_m$  рабочие поверхности твердосплавного инструмента подвержены абразивно-адгезионному износу. И при скорости резания  $V_m$  имеет место минимальный период стойкости  $T_m$ . Из рис. 1 находим

$$V_{n3} = 2V_{01} - V_{n2}. \quad (3)$$

Положительной стороной явления наростообразования является то, что нарост защищает лезвие резца от непосредственного контакта со сходящей стружкой и его заднюю поверхность с поверхностью резания обрабатываемой заготовки. Это уменьшает износ лезвия и увеличивает стойкость инструмента. Отрицательной стороной этого явления является то, что периодический срыв нароста вызывает изменение сил резания и появление вибраций. Его твердые частицы перемещаются на заднюю поверхность резца, изнашивают ее и царапают обработанную поверхность, увеличивая ее шероховатость. При срыве нароста за счет касательных напряжений происходит удаление частиц твердого сплава, особенно кобальта.

Явление наростообразования связано в основном с температурой, возникающей в зоне резания при увеличении скорости резания. Она является основным фактором, определяющим физическое состояние контакта рабочих поверхностей резца со сходящей стружкой и поверхностью резания заготовки. Температура резания зависит от величины тепловых потоков, исходящих из зон теплообразования в стружку, заго-

товку и инструмент. Доля теплового потока, исходящего в инструмент, мала и составляет менее 5 % [5, 9]. Однако средняя температура наружной контактной передней поверхности резца значительно больше средней температуры стружки и заготовки. Из [5, 9] известны температуры в зоне резания при скоростях  $V_{01}$  до  $V_m$ , которые получены в результате экспериментальных исследований и, соответственно, равны 300 и 600 °С. Температуру резания для скорости  $V_{n2}$  можно определить как среднюю температуру от этих температур ( $\Theta_{n2} = 450$  °С).

Тогда скорости резания, соответствующие этим температурам, определяются из следующих зависимостей [8]:

$$V_{01} = V_0 \left( \frac{300 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_v}}; \quad (4)$$

$$V_{n2} = V_0 \left( \frac{450 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_v}}; \quad (5)$$

$$V_m = V_0 \left( \frac{600 - \Theta_n}{\Theta_0 - \Theta_n} \right)^{\frac{1}{X_v}}, \quad (6)$$

где  $V_0$  – скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента, м/мин;  $\Theta_n$  – температура резания в начале обработки,  $\Theta_n = 20 \dots 25$  °С;  $\Theta_0$  – оптимальная температура резания, °С [10];  $X_v$  – интенсивность нарастания температуры от скорости резания,

$$X_v = \frac{\lg \Theta_0 - \lg \Theta_n}{\lg V_0}. \quad (7)$$

Однако указанные величины температур до сих пор не обоснованы изменением теплофизических характеристик компонентов состава твердого сплава при резании.

Как ранее отмечалось, изучению процесса наростообразования посвящено много работ [3, 5]. Используя результаты этих исследований, можно дополнительно представить следующую последовательность процесса образования, стабилизации и схода нароста с передней поверхности твердосплавного режущего инструмента. Кроме таких факторов, как режимы резания, механические характеристики обрабатываемого материала и т. д., чередование периодов существования нароста зависит от изменения теплофизических характеристик компонентов состава твердого сплава инструмента при резании.

Интенсивность теплового потока, поступающего в резец, зависит от коэффициента теплопроводности  $\lambda$  каждого компонента твердого сплава, величина которого изменяется от температуры (рис. 2). Чем больше коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , тем большее количе-

ство тепла проходит через единицу площади поверхности определенного компонента твердого сплава. На рис. 2 представлено изменение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для трех компонентов твердого сплава резца Т15К6 [11]. С увеличением скорости резания и температуры коэффициент теплопроводности вольфрама  $\lambda_w$  уменьшается до температуры 300 °С по степенной зависимости

$$\lambda_w = 174 - 0,552\Theta^{0,81} \quad (8)$$

при  $0 \leq \Theta \leq 300$  °С, а при  $\Theta \geq 300$  °С – по линейной

$$\lambda_w = 132 - 0,04714\Theta, \quad (9)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности вольфрама, Вт/(м·град);  $\Theta$  – средняя температура резания, °С.

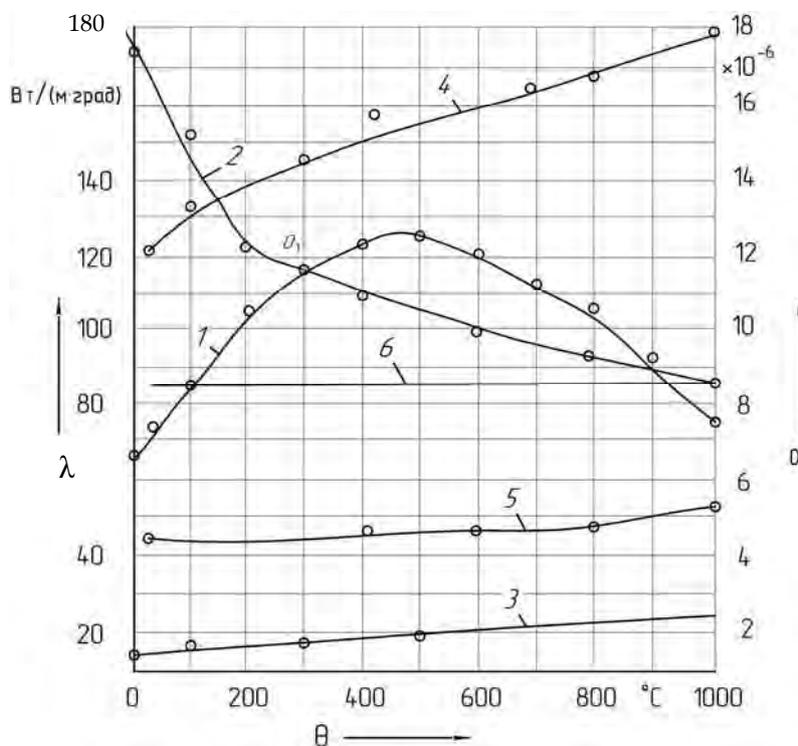


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности и линейного расширения компонентов твердого сплава от температуры: 1 –  $\lambda = f(\Theta)$  – Co (кобальт); 2 –  $\lambda = f(\Theta)$  – W (вольфрам); 3 –  $\lambda = f(\Theta)$  – Ti (титан); 4 –  $\alpha = f(\Theta)$  – Co; 5 –  $\alpha = f(\Theta)$  – W; 6 –  $\alpha = f(\Theta)$  – Ti

С увеличением температуры резания коэффициент теплопроводности кобальта изменяется по параболической зависимости

$$\lambda_{Co} = 68 + \frac{228}{900}\Theta - \frac{228}{900^2}\Theta^2. \quad (10)$$

Принимается экстремальное максимальное значение при температуре  $\Theta = 450^\circ\text{C}$  с коэффициентом  $\lambda_{Co} = 124,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ , что соответствует точке  $B_2$  перегиба кривой  $T_{01} = f(v)$  и скорости резания  $V_{n2}$  (см. рис. 1).

Пересечение линий коэффициентов теплопроводностей  $\lambda_w$  (8) и  $\lambda_{Co}$  (10) происходит в точке  $O_1$  при  $\Theta = 300^\circ\text{C}$  и  $\lambda = \lambda_w = \lambda_{Co} = 118 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ , что соответствует скорости  $V_{01}$  и первому экстремуму зависимости стойкости от скорости резания  $T_{01} = f(v)$  (см. рис. 1).

Далее проследим процесс образования нароста на передней поверхности резца при увеличении скорости резания от  $V_{n3}$  (см. рис. 1) и температуры  $\Theta \geq 108^\circ\text{C}$  [8]. Вначале отметим, что нарост можно разделить на две части: подошву, адгезионно приваренную

(приклеенную) к передней поверхности резца, и шапку, изменяющуюся во времени по высоте [5].

При увеличении температуры размеры зерен карбида вольфрама, заключенные в оболочку кобальта, почти не претерпевают никаких изменений, поскольку коэффициент линейного расширения вольфрама остается практически постоянным (см. рис. 2). Зерна кобальта, напротив, при увеличении температуры увеличиваются в размерах вследствие увеличения коэффициента линейного удлинения  $\lambda_{Co}$  (см. рис. 2). Они удлиняются, выступая над передней поверхностью, препятствуют перемещению стружки, претерпевают от нее упругие и пластические деформации на изгиб, тем самым увеличивается площадь передней поверхности, занятая кобальтом. Это приводит к увеличению толщины подошвы, высоты шапки нароста, переднего действительного угла и к уменьшению деформации стружки и к минимальному значению ее усадки (рис. 3).

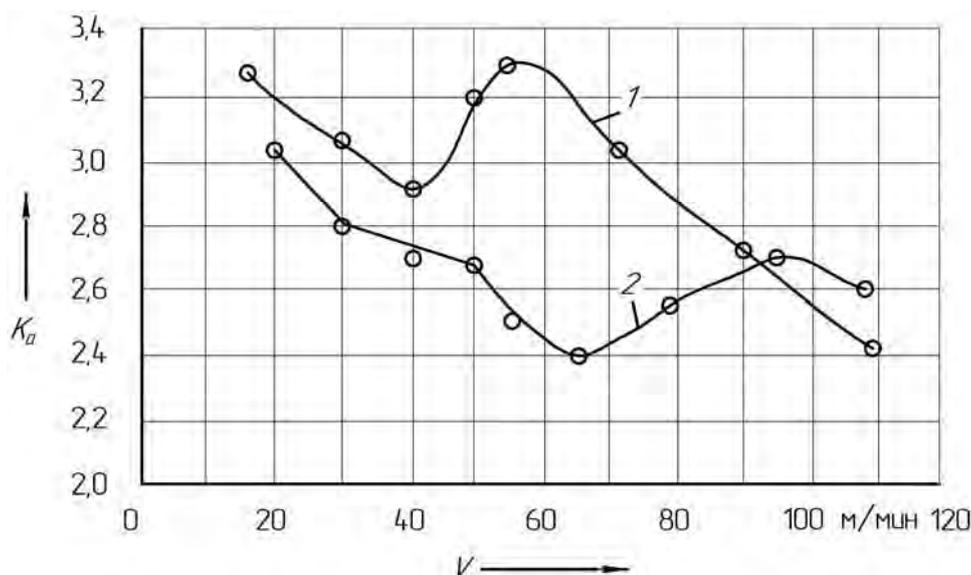


Рис. 3. Изменение коэффициента усадки стружки от скорости резания:  $t = 1,0 \text{ мм}$ ;  $S = 0,24 \text{ мм/об}$ ; 1 —  $b = 0$ ; 2 —  $b = 1,2 \text{ мм}$ ;  $h = 0,6 \text{ мм}$

Этот процесс происходит до равенства удельных коэффициентов теплопроводности  $\lambda_w = \lambda_{Co}$ , что соответствует температуре 300 °С (см. рис. 2). В этом случае каждая единица площади поверхностей компонентов твердого сплава карбида вольфрама и кобальта пропускает через себя одинаковой величины поток тепла. Подошва в этот момент более или менее неподвижна, что говорит о некоторой стабилизации процесса резания, обеспечивая при скорости резания  $V_{01} = 40$  м/мин максимальный период стойкости инструмента (см. рис. 1).

При увеличении температуры в зоне резания больше 300 °С коэффициент теплопроводности кобальта  $\lambda_{Co}$  увеличивается, а вольфрама  $\lambda_w$  уменьшается. При этом значения коэффициентов поменялись местами, теперь  $\lambda_{Co} > \lambda_w$ . При тех же условиях коэффициент линейного расширения кобальта  $\alpha_{Co}$  увеличивается и становится значительно больше коэффициента линейного расширения вольфрама  $\alpha_w$ . С увеличением температуры кобальт, поднимаясь вследствие линейного расширения над передней поверхностью, производит местную поперечную деформацию подошвы и части шапки нароста. Разновысотное положение одной части нароста относительно другой приводит к тому, что менее прочная часть шапки нароста

уносится стружкой, увеличивая площадь контакта задней поверхности резца с быстроперемещающейся поверхностью резания заготовки и ее износ. Период стойкости инструмента умеренно уменьшается до температуры  $\Theta = 450$  °С, где имеет место максимальное значение коэффициента  $\lambda_{Co}$ , а скорость резания соответствует значению скорости  $V_{n2}$  перегиба кривой  $T_{01} = f(v)$  (см. рис. 1). Дополнительно отметим, что повышение температуры в зоне резания больше 300 °С приводит к уменьшению коэффициента трения между подошвой и передней поверхностью резца и к более заметному перемещению подошвы по направлению схода стружки.

При увеличении скорости резания  $V > V_{n2}$  увеличивается температура в зоне резания и на передней поверхности резца более 450 °С. Это приводит к интенсификации абразивно-адгезионного износа инструмента, выражающегося в местном срыве нароста, а его передняя поверхность принимает ячеистый вид [9]. Увеличение температуры сверх температуры  $\Theta > (0,25...0,3)\Theta_{пл}$ , а для чистых металлов  $\Theta = 0,4\Theta_{пл}$  (где  $\Theta_{пл}$  – температура плавления сплава), ведет для деформированного металла к возникновению процесса рекристаллизации (табл. 2) [12].

Табл. 2. Температура начала  $\Theta_{нк}$  и окончания  $\Theta_{ок}$  процесса рекристаллизации

| Материал  | $\Theta_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\Theta_{нк}, ^\circ\text{C}$ | $\Theta_{ок}, ^\circ\text{C}$ |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Кобальт Со  | 1490                          | 447                           | 596                           |
| Сталь 45  | 1530                          | 459                           | 612                           |
| <i>Примечание – <math>\Theta_{пл}</math> – температура плавления сплава; <math>\Theta_{нк} = 0,3\Theta_{пл}</math>; <math>\Theta_{ок} = 0,4\Theta_{пл}</math></i> |                               |                               |                               |

Как видно из таблицы, начало и окончание процесса рекристаллизации вкладывается в предел температур 450...600 °С.

Процесс рекристаллизации заключается в появлении зародышей, возник-

новении и росте новых недеформированных зерен взамен деформированных, в нашем случае зерен кобальта и стали подошвы.

В результате процесса рекристаллизации происходит разупрочняющий

процесс: уменьшение твердости шапки нароста и его подошвы, которая становится по твердости меньше твердости сходящей стружки. Улучшаются свойства металла, главным образом повышается его пластичность. Свешивающаяся за лезвие шапка нароста покидает вместе с кобальтом и зёрнами карбида вольфрама переднюю поверхность резца первой, перемещаясь под заднюю поверхность инструмента, царапая и изнашивая ее. Нарост перестает играть блокирующую роль и постепенно «мягкая» подошва нароста, менее подвижная, чем стружка, вырождается в тонкий слой и удаляется (сходит) с передней поверхности резца твердой стружкой и исчезает вовсе при температуре 600 °С в конце процесса рекристаллизации.

Таким образом, можно выделить по скорости резания три участка, в пределах которых нарост набирает силу, стабилизируется, уменьшается и исчезает вовсе. Это участки  $V_{n3} \leq V \leq V_{01}$ ,  $V_{01} \leq V \leq V_{n2}$  и  $V_{n2} \leq V \leq V_m$ , соответствующие следующему диапазону температур: 100...300, 300...450 и 450...600 °С.

Значительное падение стойкости резца в диапазоне температур от 450 до 600 °С или скоростей резания от  $V_{n2}$  до  $V_m$  можно уменьшить созданием на его передней поверхности микрорельефа, имеющего форму, например, цилиндрического желоба (канавки) с выходом его на вспомогательное лезвие и отстоящую от главного лезвия на величину, соизмеримую с толщиной срезаемого слоя металла (рис. 4). Перемещающаяся разупрочненная подошва нароста встречает на своем пути препятствие в виде цилиндрического желоба (канавки), входит и выходит из него с меньшей скоростью в результате тормозящего действия силы трения канавки. Стружка, перемещающаяся с большей скоростью по поверхности подошвы и адгезионно связанная с ней, тоже притормаживается, уменьшая скорость своего перемещения. В результате тормозного

действия сил трения все происходит аналогично, как и при увеличении толщины срезаемого слоя металла: увеличивается толщина подошвы, высота шапки нароста, действительный передний угол, уменьшается усадка стружки и происходит частичный уход из зоны скоростей рекристаллизации (см. рис. 1). Зона скоростей резания рекристаллизации для резца без микрорельефа начинается со скорости резания  $V_{n2} = 72,0$  м/мин и оканчивается при скорости резания  $V_m = 110$  м/мин (см. рис. 1). Протяженность зоны скоростей рекристаллизации составляет 38 м/мин. Для резца с микрорельефом она начинается со скорости  $V_{n2} = 97$  м/мин и оканчивается при скорости резания  $V_m = 110$  м/мин (см. рис. 1). Протяженность этой зоны составляет 13 м/мин. Таким образом, имеем сокращение интервала скоростей резания зоны рекристаллизации на 25 м/мин, что обеспечивает увеличение периода стойкости инструмента при  $V = 110$  м/мин в 1,49 (85/57) раза (рис. 5). Величины износа задней поверхности резца могут быть установлены по следующим экспериментальным зависимостям (см. рис. 5) [8]:

$$h_z = 68\tau^{0,494}; \quad (11)$$

$$h_{zm} = 56\tau^{0,494}, \quad (12)$$

где  $h_z$  и  $h_{zm}$  – величины износа задней поверхности резца без и с микрорельефом соответственно, мкм.

Оптимальная область эксплуатации инструмента по стойкости смещается в сторону увеличения скоростей резания. Так, для резца без микрорельефа  $V_{01} = 40$  м/мин, а с микрорельефом  $V_{01}^m = 65$  м/мин (см. рис. 1). Получим увеличение ресурса работы инструмента [14] и производительность в 1,6 (65/40) раза.

Теперь определим размеры микрорельефа канавки, которые обеспечили бы такое повышение силы трения (сцепления) подошвы при перемещении

ее по радиусу цилиндрического желоба. Увеличение силы трения определим по приведенному коэффициенту трения, используя методику [13],

$$f_0 = f \frac{\alpha}{\sin \alpha}, \quad (13)$$

где  $f, f_0$  – коэффициент трения и приведенный коэффициент трения соответ-

ственно;  $\alpha$  – угол между вертикальной осью канавки и радиусом, проведенным из центра канавки в любую ее точку (см. рис. 4).

Максимальный приведенный коэффициент трения  $f_0$  получаем при  $\alpha = \pi/2$ . Тогда

$$f_0 = 1,57 f. \quad (14)$$

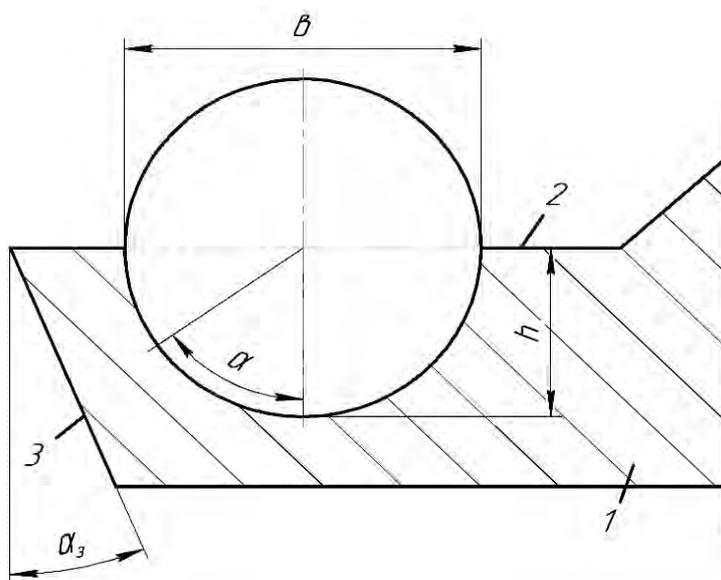


Рис. 4. Профиль канавки на передней поверхности резца: 1 – резец; 2 – передняя поверхность; 3 – задняя поверхность;  $b$  – ширина канавки;  $h$  – глубина канавки;  $\alpha$  – угол заточки задней поверхности резца

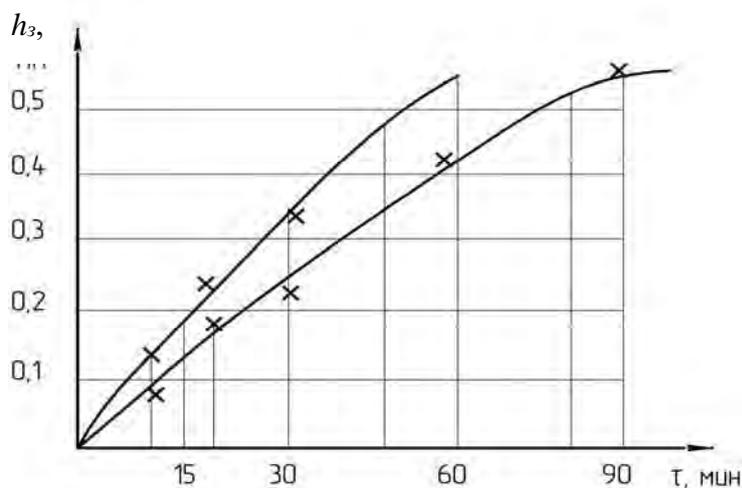


Рис. 5. Зависимость износа призматического резца от времени резания:  $t = 1,0$  мм;  $S = 0,24$  мм/об;  $V = 110$  м/мин; -- расчет; x – эксперимент

Отсюда можно сделать вывод, что оптимальный микрорельеф канавки цилиндрического желоба должен быть таким, чтобы глубина канавки была равна половине ее ширины. Тогда она обеспечит увеличение силы трения на 57 %.

### Выводы

1. Установлены периоды жизни нароста от возникновения, роста, стабилизации, уменьшения и схода с передней поверхности твердосплавного инструмента от изменения теплофизических характеристик компонентов твердого сплава при резании и их величины по скорости резания, интервала температур и стойкости инструмента.

2. Установлено, что для данного сочетания материала деталей и твердосплавного инструмента при различных комбинациях глубины резания и подачи:

– оптимальная скорость резания, обеспечивающая максимальный период стойкости твердосплавного инструмента в зоне наростообразования, соответствует моменту равенства коэффициентов теплопроводностей кобальта и вольфрама, изменяющихся от скорости резания и температуры, и температуре в зоне резания, равной 300 °С;

– скорость резания  $V_{m2}$  в точке перегиба кривой  $T_{01} = f(v)$  соответствует максимальному (экстремальному) значению коэффициента теплопроводности кобальта и температуре в зоне резания, равной 450 °С начала процесса рекристаллизации;

– скорость резания  $V_m$  соответствует концу процесса рекристаллизации кобальта и материала нароста детали и минимальному значению периода стойкости инструмента при переходе от абразивно-адгезионного к абразивно-окислительному его износу и температуре резания, равной 600 °С.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даниелян, А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов / А. М. Даниелян. – Москва: Машиностроение, 1954. – 276 с.
2. Лоладзе, Т. Н. Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
3. Зорев, Н. Н. О процессе износа твердосплавного инструмента / Н. Н. Зорев, Д. Н. Клауч, В. А. Батырев // Вестн. машиностроения. – 1971. – № 11. – С. 70–73.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.
5. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1958. – 357 с.
6. Грановский, Г. И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г. И. Грановский. – Москва: Машиностроение, 1982. – 112 с.
7. 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.
8. Шатуров, Д. Г. Исследование влияния скорости резания на триботехнические характеристики процесса точения твердосплавным инструментом в широком диапазоне изменения скорости резания / Д. Г. Шатуров, В. К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 88–96.
9. Кожевников, Д. В. Резание металлов: учебник для вузов / Д. В. Кожевников. – 2-е изд., доп. – Москва: Машиностроение, 2012. – 304 с.
10. 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.
11. Чиркин, В. С. Теплопроводность промышленных материалов / В. С. Чиркин. – Москва: Машгиз, 1962. – 340 с.

12. **Гуляев, А. П.** Металловедение / А. П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1985. – 542 с.
13. **Машков, А. А.** Теория механизмов и машин / А. А. Машков. – Минск: Вышэйшая школа, 1971. – 471 с.
14. **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.

*Статья сдана в редакцию 12 октября 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, чл.-кор. НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет. E-mail: ShelehV@tut.by.

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

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