

УДК 621.923

*А. Н. Жигалов, Д. Г. Шатуров, А. А. Жолобов, А. С. Ранцевич*

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НИЗКИХ И СРЕДНИХ СКОРОСТЯХ РЕЗАНИЯ**

UDC 621.923

*A. N. Zhigalov, D. G. Shaturov, A. A. Zholobov, A. S. Rantsevich*

**INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A MICRORELIEF OF CARBIDE-TIPPED TOOL'S FRONT SURFACE AND PROCESSING CONDITIONS ON BUILD-UP FORMATION AT LOW AND MEDIUM CUTTING SPEEDS**

**Аннотация**

Показано, что при обработке в зоне скоростей резания, при которых может возникать наростообразование, уменьшение износа инструмента возможно достичь путем создания на передней поверхности инструмента специального микро рельефа в виде канавок, расположенных под углом по отношению к главному лезвию. Установлено, что при увеличении угла канавки от 0 до 32° величина нароста будет увеличиваться. Изменением угла канавки на передней поверхности режущего лезвия по отношению к передней плоскости возможно, с одной стороны, увеличить величину нароста на передней поверхности и тем самым увеличить стойкость режущего инструмента при скоростях резания 25...35 м/мин, с другой стороны, возможно повышение производительности процесса обработки за счет увеличения скоростей резания до 55 м/мин.

**Ключевые слова:**

твердые сплавы, образование нароста, износ, стойкость режущих пластин.

**Abstract**

During machining in the cutting speed range in which a build-up may occur, a decrease in tool wear can be achieved by creating a special microrelief on the front surface of the tool in the form of grooves angled with respect to the main blade. It has been found that with an increase in the groove angle from 0 to 32°, a build-up size will increase. By changing a groove angle on the front surface of the cutting blade with respect to the tool face, it is possible, on the one hand, to increase a build-up size on the front surface and thereby to increase tool durability at cutting speeds of 25...35 m/min, and, on the other hand, it makes possible to improve productivity of the machining process by increasing cutting speeds up to 55 m/min.

**Keywords:**

cemented carbides, build-up formation, wear, durability of cutting inserts.

**Введение**

Повышение стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента является народно-хозяйственной задачей. Имеется большое количество научных разработок, связанных с исследова-

нием мероприятий, направленных на повышение стойкости твердосплавного инструмента, работающего при больших скоростях резания (свыше 100 м/мин) [1, 2]. В то же время исследований, связанных с повышением стойкости инструмента при низких и средних



(до 80...100 м/мин) скоростях резания, недостаточно. В результате чего отсутствуют промышленные рекомендации и мероприятия, направленные на повышение стойкости при работе металло-режущего твердосплавного инструмента при низких и средних скоростях резания, в связи с чем эффективность обработки инструментом на таких скоростных диапазонах низкая.

Известно, что при низких и средних скоростях резания на передней поверхности лезвия режущего инструмента образуется нарост – когда возникает более или менее неподвижная область материала обрабатываемой заготовки, расположенная у лезвия инструмента перед передней поверхностью. Твердость нароста в 2,5–3 раза превосходит твердость обрабатываемого материала, из которого нарост образовался. На размеры нароста основное влияние оказывают род и механические свойства обрабатываемого материала, скорость резания, толщина срезаемого слоя (подача), передний угол инструмента и применяемая смазочно-охлаждающая жидкость. При резании среднеуглеродистых конструкционных сталей максимальную высоту нарост имеет при скоростях резания 15...30 м/мин, но уже при скоростях резания более 80...100 м/мин нарост отсутствует [3, 4]. При всех своих недостатках, таких как образование увеличенной шероховатости обработанной поверхности, надрывов и борозд, образующихся от внедрения части нароста в обработанную поверхность, периодическое изменение силы резания, возможность возникновения вибраций, положительной стороной зоны наростообразования является то, что по отношению к инструменту нарост выполняет защитные функции, препятствуя контакту стружки с передней поверхностью резца, и тем самым уменьшает изнашивание его рабочих поверхностей [3, 5]. Измерить величину нароста сложно, так как нарост постоянно в доли секунд возникает и скалывается.

В [5] сделан вывод, что при обработке в зоне скоростей резания, при которых может возникать наростообразование, уменьшение износа инструмента возможно достичь путем создания на передней поверхности инструмента специального микрорельефа в виде отдельных углублений или канавок, расположенных под некоторым углом по отношению к главному лезвию. В процессе резания углубления микрорельефа будут частично или полностью заполняться обрабатываемым материалом или наростом, что увеличивает его сцепление с передней поверхностью инструмента.

Микрорельеф в виде лунок, углублений и канавок, шириной превышающей ширину среза, может быть образован в процессе изготовления пластин, а также на готовом изделии – лазерным лучом. Лазерная технология обработки основана на поглощении лазерного излучения материалом. При взаимодействии лазерного луча с поверхностью материала из-за высокой плотности поступающей энергии, которая достаточно быстро переходит в тепло, происходит расплавление материала и образование на нем углублений различных по конфигурации и размерам, зависящих от параметров обработки [6].

Процесс резания сопровождается отделением стружки от обрабатываемого материала. При превращении срезаемого слоя в стружку размеры стружки по длине, толщине и ширине отличаются от размеров срезаемого слоя, из которого стружка образовалась. Отношение длины срезанного слоя к длине полученной стружки или толщины стружки к толщине срезаемого слоя характеризуется коэффициентом усадки стружки. Усадка стружки показывает, как сильно деформируется металл при резании. Поэтому усадку стружки можно принять за показатель деформации обрабатываемого металла в процессе резания.



Различные факторы, действующие при резании, оказывают взаимное влияние на деформационные и контактные процессы в зоне резания. Известно, что на усадку стружки большое влияние оказывает нарост, образующийся на передней поверхности. Так как с момента появления нароста действительная величина переднего угла возрастает, то и срезаемый слой деформируется меньше.

При резании материалов, склонных к наростообразованию, высота нароста  $H$  и коэффициент усадки стружки  $K_a$  находятся во взаимосвязи, аналогичной как представлено на рис. 1 [3].

Исходя из рис. 1 видно, что минимальная величина коэффициента усадки стружки образуется при максимальной величине нароста.

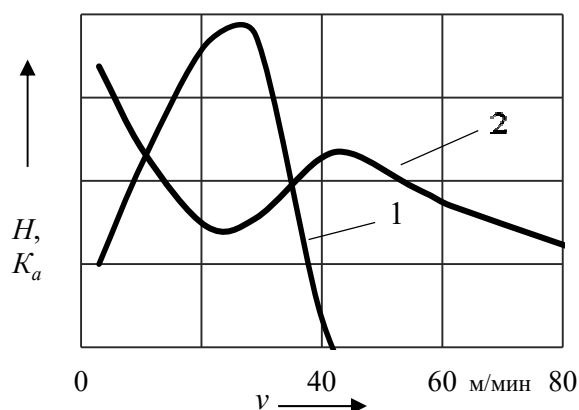


Рис. 1. Зависимости высоты нароста  $H$  (1) и коэффициента усадки стружки  $K_a$  (2) от скорости резания

Коэффициент усадки стружки  $K_a$  возможно определить через отношение толщины стружки к толщине срезаемого слоя  $a$  (длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки), связанной с подачей  $s$ , мм/об, через главный угол в плане режущего лезвия  $\varphi$ , как  $a = s \sin \varphi$  [3]. В связи с чем

$$K_a = a_c / s \cdot \sin \varphi. \quad (1)$$

### Основная часть

Была поставлена задача провести анализ влияния режимов резания, деформационных параметров в зоне резания (усадки стружки) и геометрических параметров (углов) нанесенных канавок (микрорельефа) на рабочих поверхностях режущего инструмента при скоростях резания от 10 до 82,3 м/мин. Экс-

перименты проводились на токарно-винторезном станке 16Д25. Обработывались заготовки диаметром 73,8 мм из стали 45 и 40Х резцом проходным (углы  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\gamma = -10^\circ$ ) ННТNR 2520 M11, 2102-0255 с механическим креплением 5-гранной твердосплавной пластиной 10113-110408 сплава Т5К10 без стружечной канавки. Измерение толщины стружки осуществлялось микрометром FORSAGE F-5096P9025 Тайвань (диапазон 0...25 мм; разрешение 0,001 мм; погрешность измерения  $\pm 0,02$  мм).

На передней поверхности режущего лезвия пластин также изготавливались канавки на расстоянии  $f = 0,15$  мм от режущей кромки и расположенные под углами  $\gamma_k = 10^\circ$  и  $\gamma_k = 32^\circ$  по отношению к передней поверхности пластины. Канавки изготавливались методом выжигания лазерным лучом. На рис. 2,  $a$



показана схема канавки, а на рис. 2, б – твердосплавная пластина с нанесенными канавками. На рис. 3 показаны вид

сверху и с боку канавок с углами  $\gamma_k = 10^\circ$  (а) и  $\gamma_k = 32^\circ$  (б).

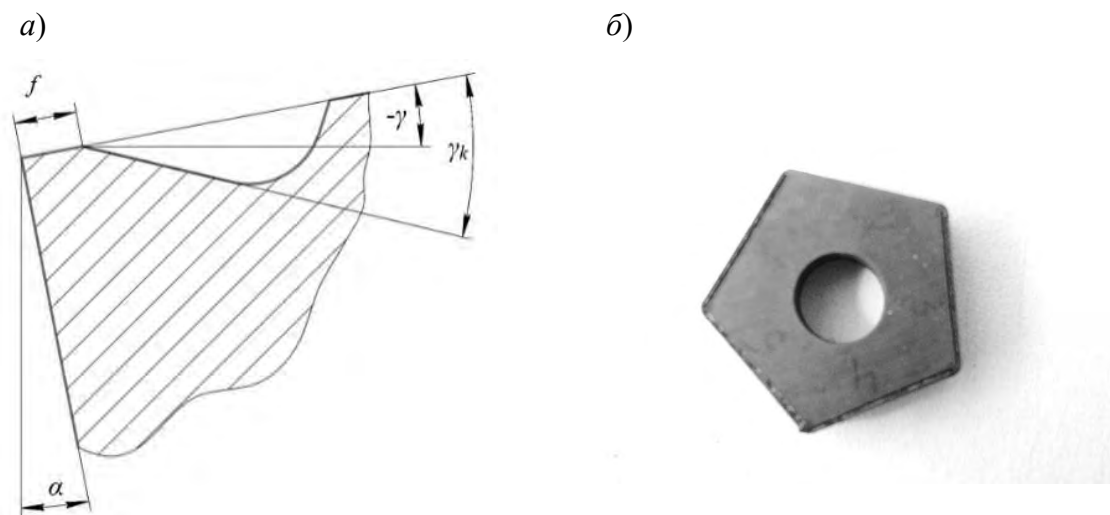


Рис. 2. Схема канавки (а) и внешний вид пластины с канавками (б)

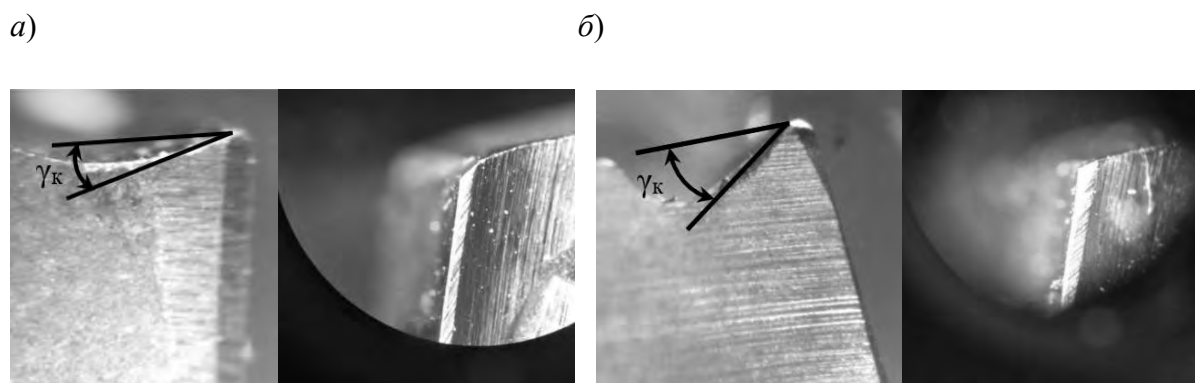


Рис. 3. Вид сбоку и сверху канавки на пластине Т5К10 с углом  $\gamma_k = 10^\circ$  (а) и  $\gamma_k = 32^\circ$  (б)

Кроме того, ставились эксперименты по выполнению указанной выше задачи, при обработке металлорежущим твердосплавным инструментом, который предварительно упрочнялся аэродинамическим звуковым методом (АДУ). Метод АДУ способен обеспечивать повышение стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при прерывистом резании и с ударными нагрузками, в 1,2–3,8 раза [7]. Эффект при упрочнении методом АДУ достигается за счет воздействия на

структуру твердых сплавов волн звуковой частоты в резонансном спектре частот. После упрочнения в твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры, увеличивается ударная вязкость при сохранении заданной при производстве твердости [8].

Предварительно определялась оптимальная скорость резания, при которой будет минимальный коэффициент усадки стружки. Для чего на пода-

че  $s = 0,24$  мм/об и глубине резания  $t = 1$  мм были поставлены два опыта по определению влияния скорости резания на коэффициент усадки стружки при обработке заготовки из стали 40X (рис. 4).

Из рис. 4 видна идентичность двух кривых, что говорит о достаточной схожести результатов исследований, а также, что в диапазоне скоростей резания от 10 до 50 м/мин коэффициент

усадки стружки минимален при скорости резания 27...30 м/мин.

Далее определялось влияние коэффициента усадки стружки от подачи. Для чего на экстремальной скорости резания  $v = 29,0$  м/мин обрабатывалась заготовка из стали 40X ( $D = 73,8$  мм,  $t = 1,0$  мм) твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$ . На рис. 5 приведена зависимость коэффициента усадки стружки от подачи.

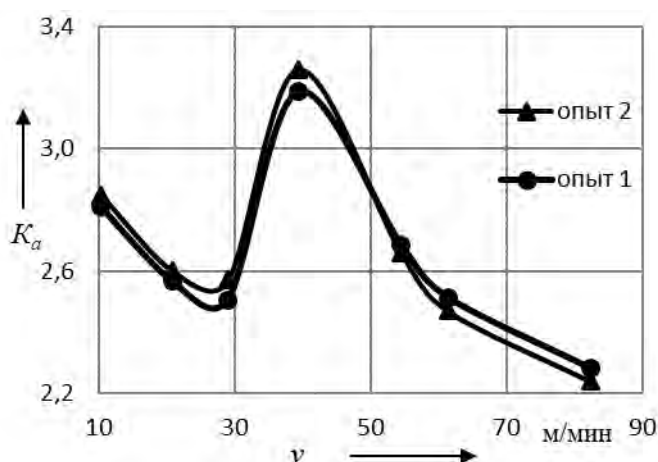


Рис. 4. Зависимость коэффициента усадки стружки  $K_a$  (опыт 1 и 2) от скорости резания  $v$  при обработке стали 40X ( $D = 73,8$  мм) пластиной Т5К10 с  $\gamma = -10^\circ$  без канавки при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1,0$  мм

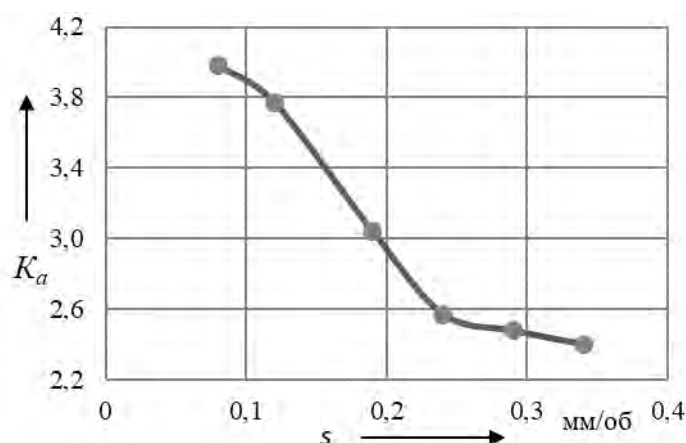


Рис. 5. Зависимость коэффициента усадки стружки  $K_a$  от подачи  $s$  при обработке заготовки из стали 40X ( $D = 73,8$  мм) пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  без канавки при  $v = 29,0$  м/мин,  $t = 1,0$  мм



Анализ рис. 5 показывает, что по мере увеличения подачи коэффициент усадки стружки уменьшается, при этом, начиная с подачи  $s = 0,24$  мм/об, интенсивность значительно снижается.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента усадки стружки от скорости резания для сталей 45 и 40X. Данные стали при незначительном от-

личии по содержанию железа имеют большое различие по своей пластичности – способность металлов перед разрушением претерпевать значительную пластическую деформацию, которая характеризуется относительным удлинением  $\sigma_5$ . Сталь 45 имеет величину относительного удлинения  $\sigma_5 = 16$  %, а сталь 40X –  $\sigma_5 = 10$  %.

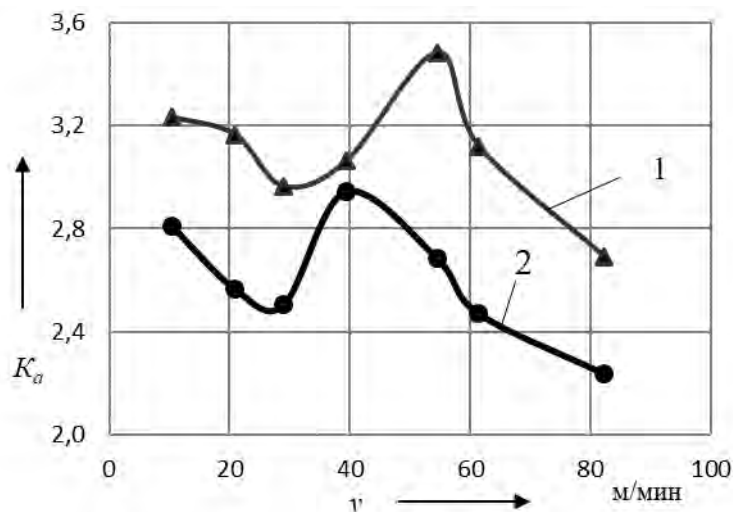


Рис. 6. Зависимости коэффициента усадки стружки  $K_a$  от скорости резания  $v$  при обработке заготовки  $D = 73,8$  мм из стали 45 (1) и 40X (2) пластиной Т5К10 с  $\gamma = -10^\circ$  без канавки при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм

Как видно из рис. 6, с увеличением пластичности обрабатываемого материала коэффициент усадки стружки увеличивается. Следует отметить, что минимальные значения коэффициента усадки стружки лежат практически в одинаковых диапазонах скоростей – 27...32 м/мин, что указывает на то, что наростообразование от физико-механических свойств обрабатываемого материала имеет слабую зависимость.

Следующим этапом проведения исследований являлась постановка опытов с целью определения влияния коэффициента усадки стружки от скорости резания при различных углах канавок на передней поверхности режущего лезвия (10 и 32°) по отношению к передней поверхности. Для чего сравнивались виды получаемой стружки и производились

замеры ее толщины.

На рис. 7 представлены виды стружек после обработки стали 45 твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  и канавкой под углом  $\gamma_k = 10^\circ$  на режимах резания:  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм и различных скоростях резания.

На рис. 8 представлены виды стружек после токарной обработки стали 45 твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  и стружечной канавкой с углом  $\gamma_k = 32^\circ$  на режимах резания:  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм и различных скоростях резания.

Анализ полученных стружек показывает некоторое отличие по виду стружки при различных углах канавок. При наличии канавки, расположенной под углом  $\gamma_k = 10^\circ$  по отношению к пе-

редней поверхности, образующая стружка имеет признаки как элементной, так и сливной стружки. При скорости 61,4 м/мин стружка практически является только сливной. В то же время при наличии канавки под углом  $\gamma_k = 32^\circ$  образующая стружка имеет признаки как элементной, так и сливной стружки практически на всех исследуемых скоростях резания. После измерений тол-

щин стружек были определены коэффициенты усадки стружки, результаты которых представлены в табл. 1 и на рис. 9.

На рис. 10 представлены зависимости коэффициента усадки стружки  $K_a$  (1) и скорости резания, при которой образуется минимальный коэффициент  $K_a$  (2) от угла канавки  $\gamma_k$ .



$v = 10,4$  м/мин



$v = 20,9$  м/мин



$v = 29,0$  м/мин



$v = 39,4$  м/мин



$v = 54,5$  м/мин



$v = 61,4$  м/мин

Рис. 7. Виды стружек при обработке стали 45 твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  и канавкой под углом  $\gamma_k = 10^\circ$  при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм при различных скоростях резания

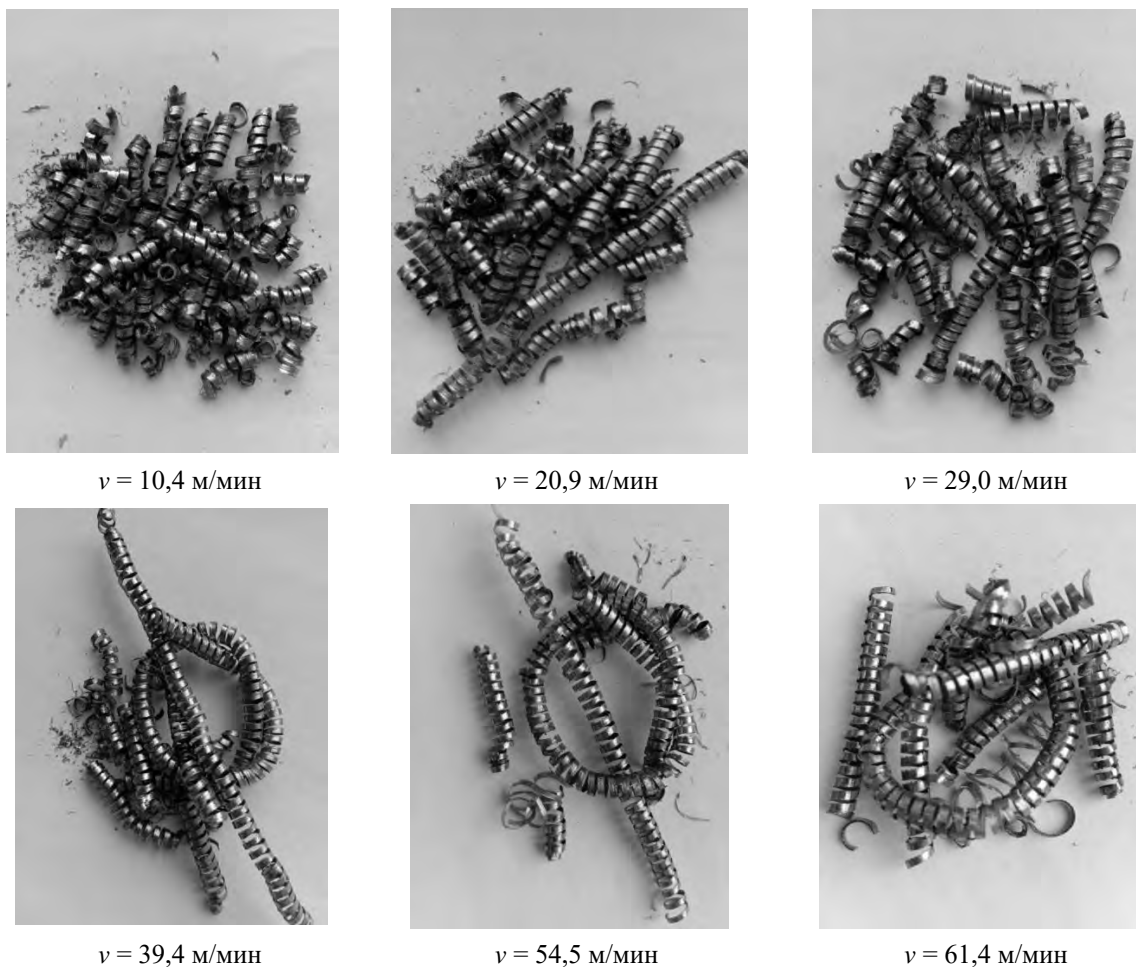


Рис. 8. Виды стружек при обработке стали 45 твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  и канавкой с углом  $\gamma_k = 32^\circ$  при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм при различных скоростях резания

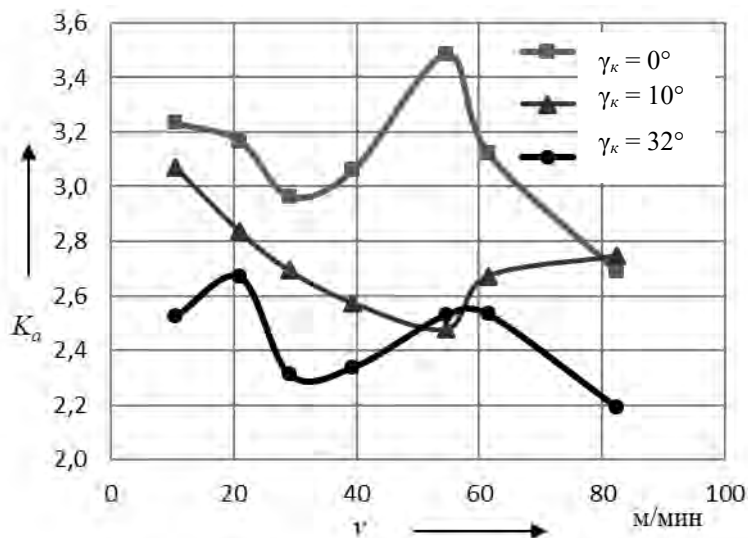


Рис. 9. Зависимости коэффициента усадки стружки от скорости резания и угла стружечной канавки при обработке заготовки из стали 45  $D = 73,8$  мм твердосплавной пластиной Т5К10 с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  и канавками с углами  $\gamma_k = 0, 10$  и  $32^\circ$  при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм



Табл. 1. Толщины стружек от угла канавки и скоростей резания при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм

Номер опыта	Скорость резания, м/мин						
	10,4	20,9	29	39,4	54,5	61,4	82,3
Угол расположения канавки – 0 град							
1	0,665	0,656	0,605	0,631	0,718	0,645	0,556
2	0,666	0,668	0,625	0,647	0,735	0,634	0,562
3	0,674	0,672	0,635	0,636	0,726	0,658	0,574
4	0,673	0,644	0,589	0,636	0,722	0,636	0,548
5	0,680	0,658	0,619	0,629	0,716	0,668	0,558
Среднее значение	0,672	0,660	0,615	0,636	0,723	0,648	0,560
$K_a$	3,23	3,17	2,96	3,06	3,48	3,12	2,69
Угол расположения канавки – 10 град							
1	0,628	0,610	0,561	0,534	0,508	0,552	0,573
2	0,621	0,610	0,572	0,546	0,516	0,566	0,562
3	0,625	0,588	0,553	0,532	0,527	0,553	0,569
4	0,644	0,561	0,552	0,522	0,512	0,564	0,582
5	0,673	0,578	0,561	0,541	0,513	0,542	0,568
Среднее значение	0,638	0,589	0,560	0,535	0,515	0,555	0,571
$K_a$	3,07	2,84	2,69	2,57	2,48	2,67	2,75
Угол расположения канавки – 32 град							
1	0,542	0,551	0,496	0,510	0,530	0,534	0,448
2	0,562	0,526	0,480	0,450	0,528	0,526	0,466
3	0,493	0,556	0,475	0,530	0,526	0,531	0,457
4	0,520	0,563	0,461	0,490	0,523	0,518	0,465
5	0,504	0,578	0,490	0,450	0,524	0,523	0,441
Среднее значение	0,524	0,555	0,480	0,486	0,526	0,526	0,455
$K_a$	2,52	2,67	2,31	2,34	2,53	2,53	2,19



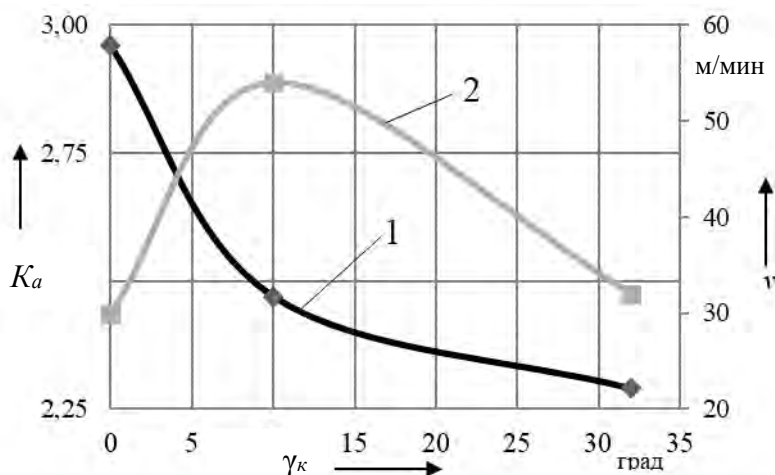


Рис. 10. Зависимости коэффициента усадки стружки  $K_a$  (1) и скорости резания  $v$  (2) от угла канавки  $\gamma_k$

Из рис. 9 и 10 следует, что при увеличении угла канавки от 0 до 32° величина коэффициента усадки стружки уменьшается с  $K_a = 2,96$  до  $K_a = 2,48$ , что обусловлено увеличением нароста. Однако при этом скорость резания, при которой будет минимальный коэффициент усадки стружки, сначала увеличивается при увеличении угла канавки от 0 до 10° с 30 до 54 м/мин, а затем уменьшается до 32 м/мин при угле канавки, равном 32°. Такое поведение коэффициента усадки стружки объясняется влиянием на усадку стружки нароста, образующегося на передней поверхности. Следовательно, изменением параметров канавки на передней поверхности режущего лезвия возможно, с одной стороны, увеличить величину нароста на передней поверхности и тем самым увеличить стойкость режущего инструмента при скоростях резания 25...35 м/мин. С другой стороны, возможно повысить производительность процесса обработки при повышенной стойкости режущей пластины из-за увеличения скоростей резания до 55 м/мин и образованием на ее поверхности нароста.

Наличие микрорельефа на передней поверхности резца увеличивает силу трения, препятствующую сходу по

ней стружки. Особенно это касается резца с  $\gamma_k = 10^\circ$ , при котором суммарный передний угол равен нулю и стружка движется по плоской передней поверхности с коэффициентом трения, равным коэффициенту внешнего трения 0,18 при угле трения, равном 10°. Уменьшения силы трения также можно достигнуть путем повышения температуры в зоне резания до оптимальной, равной  $\theta = 300^\circ\text{C}$  [3, 4]. Это достигается путем увеличения скорости резания, в нашем случае с 30 до 55 м/мин. Контроль величины температуры и оптимальной скорости резания осуществляется путем определения минимальной величины усадки стружки. Повышение скорости резания до 55 м/мин, при которой превалирует абразивно-адгезионный вид износа, повышает производительность процесса.

На рис. 11 приведены зависимости коэффициента усадки стружки от скорости резания и углов канавки при обработке заготовки из стали 45  $D = 73,8$  мм твердосплавной пластиной Т5К10, упрочненной методом АДУ, с передним углом  $\gamma = 10^\circ$  и канавки под углами 0, 10 и 32° при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм.



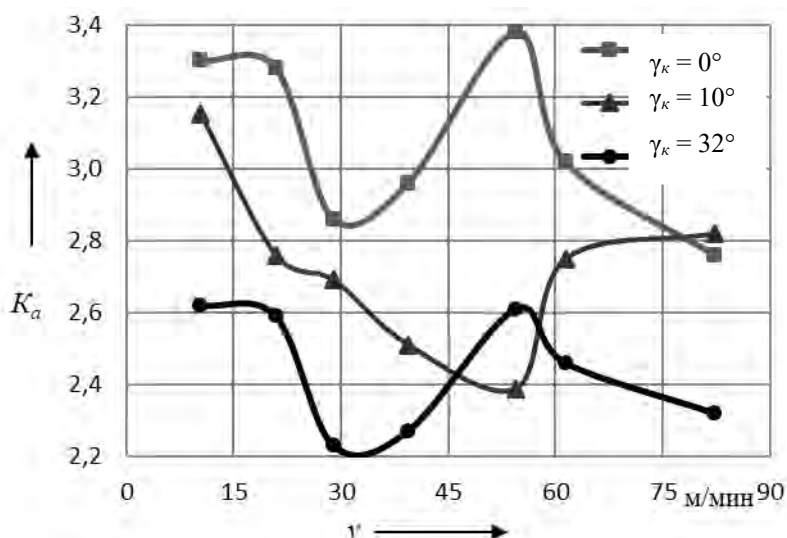


Рис. 11. Зависимости коэффициента усадки стружки  $K_a$  от скорости резания  $v$  и углов канавки  $\gamma_k$  при обработке заготовки из стали 45  $D = 73,8$  мм твердосплавной пластиной Т5К10, упрочненной методом АДУ, с передним углом  $\gamma = -10^\circ$  при  $s = 0,24$  мм/об,  $t = 1$  мм

Анализ зависимостей, изображенных на рис. 9 и 10, показывает, что при обработке металлорежущими твердосплавными пластинами Т5К10, упрочненными методом АДУ, влияние коэффициента усадки стружки и угла стружечной канавки от скорости резания при обработке заготовок из стали хотя и носит похожий характер, но значения коэффициента усадки стружки после применения метода АДУ меньше, чем без АДУ, а следовательно, величина нароста после упрочнения методом АДУ возрастает. Так, для твердосплавных пластин Т5К10 после АДУ коэффициент усадки стружки уменьшается: для пластин с углом канавки  $\gamma_k = 0^\circ$  – в 1,05 раза (с 2,97 до 2,83); с углом канавки, равном  $\gamma_k = 10^\circ$  – в 1,16 раз (с 2,47 до 2,38); с углом канавки  $\gamma_k = 32^\circ$  – в 1,05 раза (с 2,3 до 2,19). Такое поведение коэффициента усадки стружки после метода АДУ можно объяснить тем, что метод АДУ способствует уменьшению износа, возникающего при процессах прерывистого резания, появляющегося из-за образования и от-

рыва элементов нароста от лезвия инструмента. Следовательно, метод АДУ также может быть применим для увеличения величины нароста при средних скоростях резания.

### Выводы

1. Показано, что при обработке в зоне скоростей резания, при которых может возникать наростообразование, уменьшение износа инструмента возможно достичь путем создания на передней поверхности инструмента специального микрорельефа в виде канавок, расположенных под углом по отношению к главному лезвию.

2. Обосновано, что определение максимальной величины нароста возможно осуществить через установление минимальной величины коэффициента усадки стружки, который определяется через отношение толщины стружки к толщине срезаемого слоя, зависящей от подачи и главного угла в плане режущего лезвия.

3. Установлено, что максимальная



величина нароста при обработке стали 40Х твердосплавными пластинами Т5К10 с передним углом  $-10^\circ$  обеспечивается при скорости резания 27...30 м/мин и подаче 0,24...0,35 мм/об.

4. Установлено, что с увеличением пластичности обрабатываемого материала коэффициент усадки стружки увеличивается. Однако при этом минимальные значения коэффициента усадки стружки лежат практически в одинаковых диапазонах скоростей – 27...32 м/мин, что указывает на то, что наростообразование от физико-механических свойств обрабатываемого материала имеет слабую зависимость.

5. Установлено, что при наличии канавки, расположенной под углом  $10^\circ$  по отношению к передней поверхности лезвия, образующаяся стружка имеет признаки как элементной, так и сливной стружки, переходящей при скорости 61,4 м/мин практически в сливную стружку. При наличии канавки под углом  $32^\circ$  образующаяся стружка имеет признаки как элементной, так и сливной стружки практически на всех исследуе-

мых скоростях резания.

6. Установлено, что при увеличении угла канавки от 0 до  $32^\circ$  величина коэффициента усадки стружки уменьшается в 1,35 раз с  $K_a = 2,96$  до  $K_a = 2,19$  (соответственно величина нароста увеличивается), при этом скорость резания, при которой будет минимальный коэффициент усадки стружки, сначала увеличивается с 30 до 54 м/мин при увеличении угла канавки от 0 до  $10^\circ$ , а затем уменьшается до 32 м/мин при увеличении угла канавки до  $32^\circ$ . Изменением угла канавки на передней поверхности режущего лезвия по отношению к её плоскости возможно, с одной стороны, увеличить стойкость режущего инструмента при скоростях резания 25...35 м/мин за счет увеличения нароста на передней поверхности, с другой стороны, обеспечить повышение производительности процесса обработки за счет увеличения скоростей резания до 55 м/мин.

7. Установлено, что метод аэродинамического звукового упрочнения способен обеспечить увеличение нароста при средних скоростях резания.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник / С. Н. Григорьев. – Москва: Машиностроение, 2011. – 368 с.
2. Ярьсько, С. И. Физические и технологические основы упрочнения твердых сплавов: монография / С. И. Ярьсько. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2006. – 244 с.
3. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 344 с.
4. Кожевников, Д. В. Резание материалов: учебник / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – Москва: Машиностроение, 2007. – 304 с.
5. Шатуров, Д. Г. Исследование режущей способности твердосплавного лезвийного инструмента при средних скоростях резания / Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 112–119.
6. Лазерная обработка электроискровых покрытий / О. Г. Девойно [и др.] // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апр. 2012 г. – Минск: Бизнесофсет, 2012. – С. 81–82.
7. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. ВУ 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Опубл. 20.07.2015.



8. **Жигалов, А. Н.** Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.

*Статья сдана в редакцию 10 мая 2020 года*

**Анатолий Николаевич Жигалов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: jigalov6@mail.ru.

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

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: BRU\_AA@mail.ru.

**Александр Сергеевич Ранцевич**, магистрант, Белорусский национальный технический университет.  
E-mail: alex07lala@mail.ru.

**Anatoly Nikolayevich Zhigalov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: jigalov6@mail.ru.

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

**Aliaksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: BRU\_AA@mail.ru.

**Aliaksandr Sergeyeovich Rantsevich**, MSc student, Belarusian National Technical University.  
E-mail: alex07lala@mail.ru.

