

реза сопровождается повышением температуры, что вызывает падение по абсолютной величине всех напряжений в зоне резания. Это обусловлено понижением напряжений текучести  $\sigma_s$ , роль температурных напряжений здесь мала. Второму этапу резания соответствует решение при теплоемкости  $c = 23 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Вероятно, переход от первого ко второму этапу осуществляется, когда полоса сильно разогретого и размягченного металла, продвигаясь от режущей кромки, выходит на свободную поверхность перед резцом.

Напряженное состояние после такого перехода менее опасно с точки зрения трещинообразования, повреждающего обработанную поверхность. Об этом свидетельствует примерно двукратное понижение при теплоемкости  $c = 23 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  напряжений  $\sigma_1$  в передней и задней областях растяжения. Кроме того, обе области растяжения оказываются в зоне умеренного разогрева, что должно поддержать ресурс пластичности находящегося в них металла.

Следовательно, трещинообразование в зоне резания прекратится, если в достаточной степени повысить скорость резания и обеспечить тем самым сильный разогрев деформируемого металла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д о в н а р С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием. – Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук, 1985, № 2, с. 10–13. 2. Г у л я е в А.П., М а л и н и н а К.А., С а в е р и н а С.М. Инструментальные стали. – М., 1975. – 272 с.

УДК 621.941.1

Н.Н.ПОПОК, канд. техн. наук,  
С.О.ПУШКИН (НПИ)

#### СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ

Стружкообразование при ротационном точении резцом с прерывистой режущей кромкой сравнивалось со стружкообразованием при ротационном резании принудительно вращающимся инструментом с непрерывной режущей кромкой при одно- и разнонаправленных векторах скоростей вращения инструмента и движения подачи, а также самовращающимся и невращающимся инструментами. Эксперименты проводились на токарном станке мод. 162К20 с использованием установки для ротационного резания при обработке образцов из стали 50, баббита Б83 и свинца С2. Форма и усадка получаемой стружки изучались визуально и с помощью инструментального микроскопа БМИ-1, а результаты наблюдений и измерений заносились в специальный протокол, включающий данные по 36 параметрам стружки: толщине и длине; виду (стружка надлома, элементная и сливная); характеристике скручивания (направление, шаг); состоянию прирезцово́й и надрезцово́й сторон; цвету и т. д.

Предусмотренное методикой техническое моделирование процесса ротационного резания на баббитовых образцах позволяло получать легко деформируемую стружку, на которой изучались закономерности ее закручивания как в свернутом, так и развернутом состояниях, а также производились изме-

рения необходимых параметров. Полученные данные сопоставлялись с результатами исследований формы стальной стружки.

Количественно и качественно степень пластической деформации срезаемого слоя оценивалась коэффициентами усадки стружки по длине, ширине и толщине, которые определялись методом непосредственных измерений и весовым методом. При этом длина, толщина и ширина срезаемого слоя определялись по формулам, а длина, толщина и ширина стружки измерялись с помощью гибкой проволоки и микрометра (рис. 1, а, б). В случае обработки резцом с прерывистой режущей кромкой использовалась также установленная закономерность завивания стружки по кривой, близкой к логарифмической спирали (рис. 1, в). Расчет длины стружки производился по уравнению логарифмической спирали:

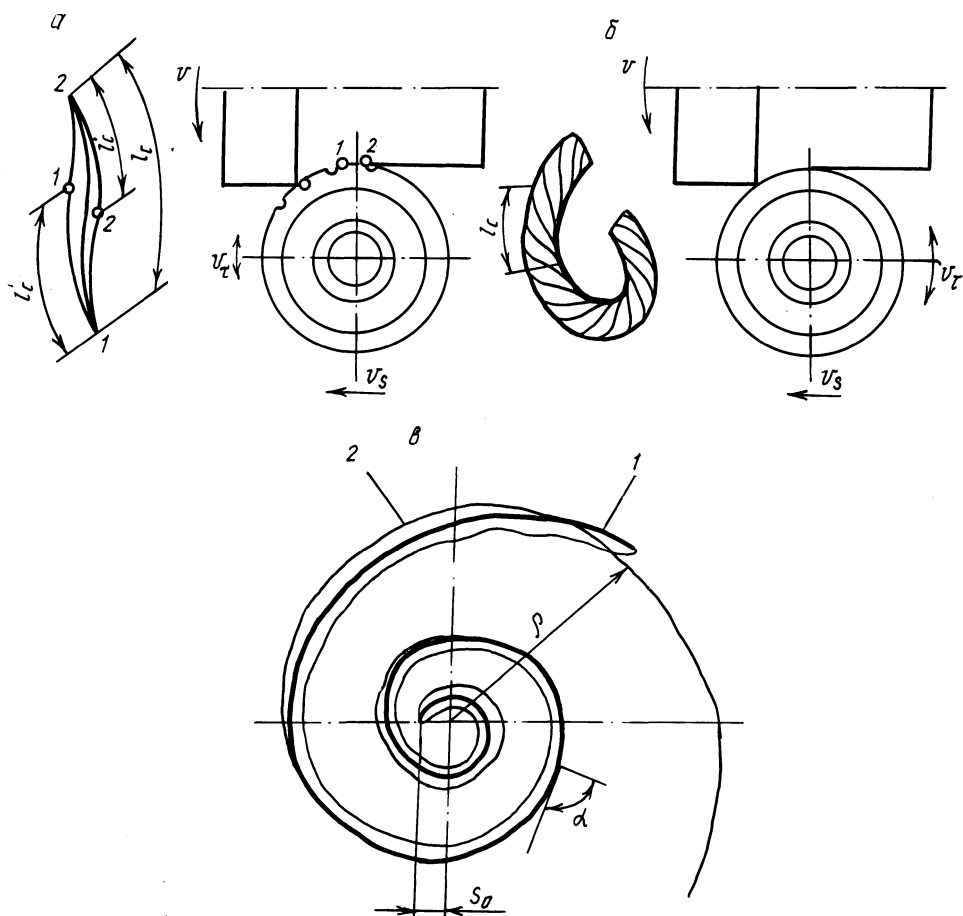


Рис. 1. К измерению параметров стружки после ротационного резания инструментом с прерывистой (а, в) и непрерывной (б) режущей кромкой:

1 – проекция стружки на плоскость; 2 – логарифмическая спираль

$$l_c = \frac{\sqrt{1 + \ln^2 q}}{\ln q} (\rho - \rho_0),$$

где  $q = \exp(1/\operatorname{tg} \alpha) = \sqrt[n]{\rho/\rho_0}$  – коэффициент роста спирали стружки;  $\alpha$  – угол между радиусом спирали и касательной к ней;  $n$  – количество витков стружки;  $\rho_0, \rho$  – начальный и конечный радиусы спирали.

Радиусы спирали  $\rho_0$  и  $\rho$  и количество витков  $n$  определялись с помощью инструментального микроскопа БМИ-1. По ним рассчитывались значения  $q$  и  $l_c$ . Сопоставление длин стружек, рассчитанных по формуле и измеренных с помощью проволоки после резания баббитовой заготовки, показывает, что данные совпадают при небольшой частоте вращения инструмента ( $n_T = 5 \dots 10$  об/мин) и небольшой подаче ( $s < 0,3$  мм/об).

Наблюдения за внешним видом стружки и фиксация при этом ее параметров позволили установить следующее. Изменения свойств металла стружки, вида прирезковой и надрезковой ее сторон и цвета при варьировании условий ротационного резания соответствовали ранее установленным закономерностям при других методах обработки.

При резании инструментом с непрерывной режущей кромкой стружка завивалась в виде пространственной спирали, как, например, при сверлении, и сходила с передней поверхности инструмента непрерывной лентой.

При резании инструментом с прерывистой режущей кромкой стружка формируется в виде отдельных завитков, которые безопасны при работе на станке, их удобнее транспортировать и перерабатывать. Длина стружки при одних и тех же режимах обработки зависела от количества зубьев  $z$  инструмента: с увеличением от 4 до 16 длина стружки уменьшалась. При изменении направления вращения инструмента с прерывистой режущей кромкой, как и при обработке резцом с непрерывной режущей кромкой, степень завивания стружки уменьшалась, и она сходила в сторону обработанной поверхности.

При анализе закономерности завивания стружки по логарифмической спирали были произведены измерения необходимых параметров у большого количества стружек. Данные показывают, что: 1) с увеличением соотношения скоростей вращения инструмента и заготовки  $v_T/v$  значения начального  $\rho_0$  и конечного  $\rho$  радиусов спирали стружки, число ее витков  $n$  и длина  $l_c$  имеют тенденцию к уменьшению, а коэффициент  $q$  – к увеличению, причем эти зависимости имеют "горб" при малых значениях соотношения  $v_T/v$ ; 2) с возрастанием скорости вращения заготовки  $v$  радиус  $\rho_0$  уменьшается, а  $\rho, n, q$  и  $l_c$  увеличиваются; 3) с ростом подачи  $s$  значения  $\rho_0, \rho, q$  и  $l_c$  увеличиваются, а  $n$  уменьшается; 4) с увеличением глубины резания  $t$  значения  $\rho_0, \rho, l_c$  растут, а  $n$  и  $q$  уменьшаются, причем изменения этих параметров незначительны по сравнению с влиянием на них соотношения  $v_T/v$ , скорости  $v$  и подачи  $s$ .

Таким образом, варьируя режим обработки принудительно вращающимся инструментом с прерывистой режущей кромкой, можно получить стружку с любыми параметрами в зависимости от конечных целей обработки.

Рассмотрение развернутой на плоскости баббитовой стружки (см. рис. 1,а) показало, что с увеличением соотношения скоростей вращения инструмента и заготовки стружка спрямлялась, а возрастание подачи и глубины резания приводило к уменьшению радиуса кривизны стружки, причем подача влияла на

закручивание стружки сильнее, чем глубина резания. Радиус кривизны стружки на входе режущей кромки в зону резания больше, чем на выходе, что свидетельствует о большей степени деформации срезаемого слоя при малых углах поворота инструмента (толщине среза). Концы стружек закручивались в сторону поверхности заготовки, от которой они отделялись, т. е. при входе режущей кромки в зону резания — в сторону обработанной поверхности, а при выходе — в сторону обрабатываемой.

Разработанная методика оценки вида стружки по физическим и геометрическим параметрам позволяет устанавливать уровень изменения характеристик процесса резания и на основании этого корректировать процесс его резания. Результаты исследований показывают, что наиболее рациональным из рассмотренных видов ротационного резания с точки зрения формы стружки является обработка принудительно вращающимся резцом с прерывистой режущей кромкой при одинаковых направлениях векторов скоростей вращения инструмента и подачи.

Изменение соотношения скоростей вращения инструмента  $v_\tau$  и заготовки  $v$  оказывает сложное влияние на коэффициенты усадки стружки по толщине  $k_a$ , длине  $k_l$  и ширине  $k_b$  для всех рассматриваемых видов ротационного резания и различных обрабатываемых материалов (см. рис. 1). В интервале соотношения  $v_\tau/v$  от 0 до 0,2 коэффициенты усадки стружки возрастают, причем интенсивность роста  $k_a$  больше, чем  $k_l$  и  $k_b$ . При увеличении  $v_\tau/v$  от 0,2 до 0,6 коэффициенты  $k_a$  и  $k_l$  интенсивно уменьшаются, а  $k_b$  стабилизируется и становится равным единице. Дальнейшее возрастание соотношения от 0,6 до 1,5 также приводит к уменьшению коэффициентов  $k_a$ ,  $k_l$  и  $k_b$ , однако гораздо меньше, чем при  $v_\tau/v = 0,2 \dots 0,6$ . Такой характер рассматриваемых зависимостей с известными представлениями о происходящих в зоне резания физических явлениях и, в частности, связан с изменением среднего коэффициента трения режущей части инструмента с заготовкой при изменении скорости резания.

Коэффициенты усадки стружки примерно одинаковы для различных видов резания принудительно вращающимся инструментом и больше, чем для невращающегося инструмента. Однако при соотношении  $v_\tau/v > 1$ , исключая образование нароста и обеспечивающем снижении коэффициента трения, усадка стружки для принудительно вращающегося инструмента становится равной или меньше усадки стружки при невращающемся инструменте. Для самовращающегося инструмента характерно резкое уменьшение коэффициента усадки стружки по толщине при увеличении угла установки инструмента  $\omega$  с 125 до 145° (рис. 2, а). С уменьшением глубины резания увеличивается коэффициент усадки стружки  $k_a$ , а с увеличением скорости главного движения незначительно увеличивается коэффициент  $k_a$  и сдвигается пик зависимости  $k_a$  от  $v_\tau/v$  в сторону меньших значений соотношения  $v_\tau/v$ .

Как видно из графиков, коэффициент усадки стружки по ширине принимает значение, равное единице, только в диапазоне  $v_\tau/v = 0,2 \dots 0,6$ , когда, видимо, условия деформирования срезаемого слоя наиболее благоприятные. При других значениях  $v_\tau/v$  коэффициент  $k_b$  меньше единицы.

Влияние скорости главного движения на коэффициент  $k_a$  незначительно как для принудительно вращающихся инструментов, так и для невращающегося (рис. 3). Зависимость  $k_a$  от  $v$  носит немонотонный характер. Коэффици-

ент усадки стружки по толщине для невращающегося инструмента меньше, чем для вращающегося, так как значение  $v_r/v$  не превышало 0,2, а для самовращающегося — больше, чем для принудительно вращающегося и невращающегося инструментов. В случае резания самовращающимся инструментом влияние скорости главного движения на коэффициент  $k_a$  велико, что можно объяснить изменением условий вращения инструмента, кинематически связанного с вращающейся заготовкой, и как следствие изменением условий деформирования срезаемого слоя.

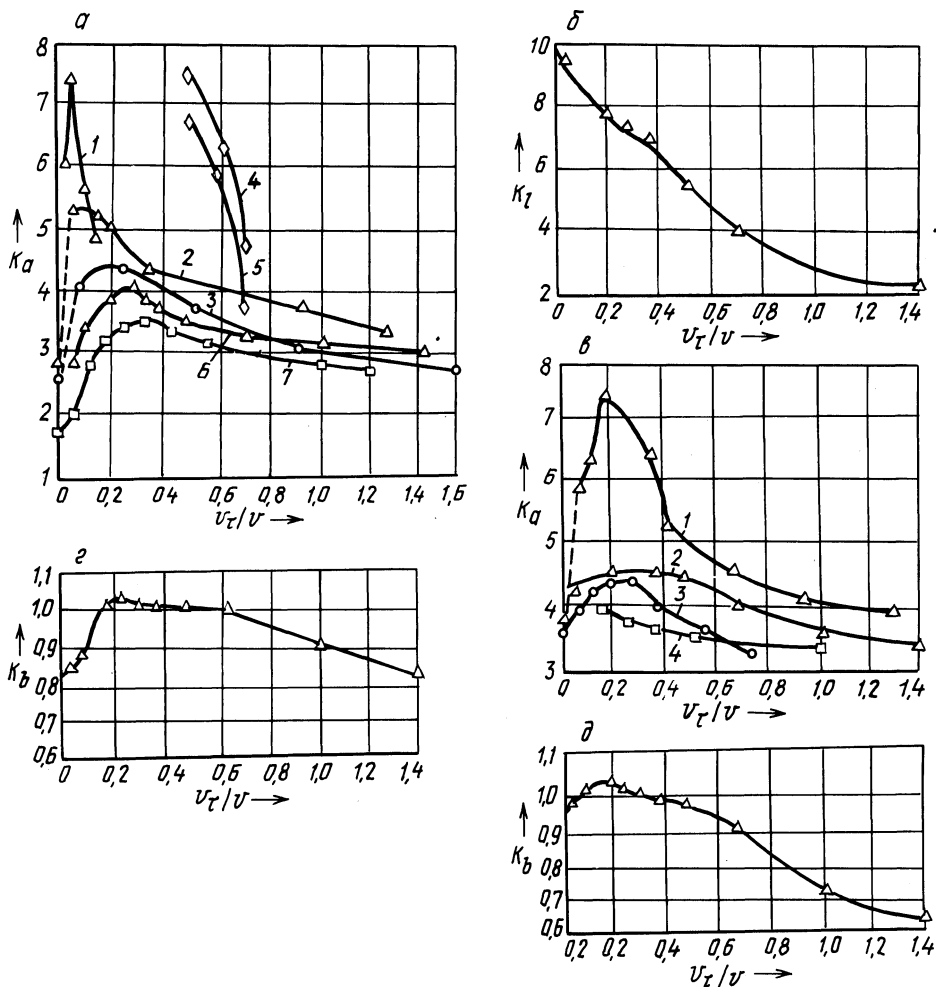


Рис. 2. Влияние соотношения скоростей вращения инструмента и заготовки на коэффициенты усадки при различных режимах резания (инструмент — сталь Р6М5;  $\gamma_r = 0$ ;  $\alpha_r = 12^\circ$ ;  $d = 49$  мм) по:

а — толщине при обработке стали 50; б, в — длине и толщине при обработке сплава баббита Б83 и свинца С2; г, д — ширине при обработке стали 50 и сплава баббита Б83 и свинца С2; 1, 2, 6 — инструмент с прерывистой режущей кромкой; 3 — с непрерывной режущей кромкой; 4, 5 — с самовращением; 7 — с разнонаправленными  $\vec{v}_r$  и  $\vec{v}_s$

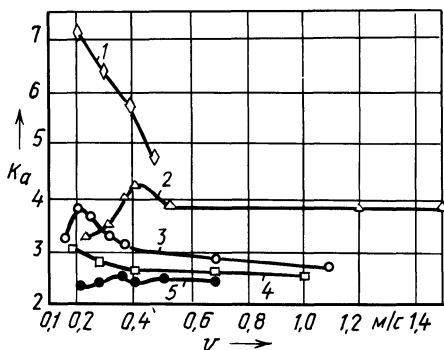


Рис. 3. Зависимость коэффициента усадки стружки по толщине от скорости главного движения (условия обработки по рис. 2*а*) при обработке инструментом: 1 — с самовращением; 2, 3 — с прерывистой и непрерывной режущей кромкой; 4 — с разнонаправленными  $\bar{v}_\tau$  и  $\bar{v}_s$ ; 5 — без вращения

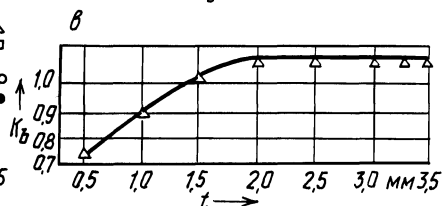
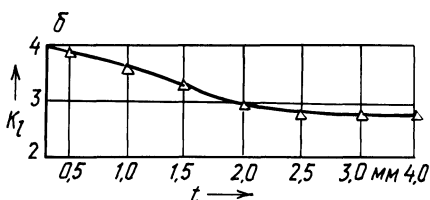
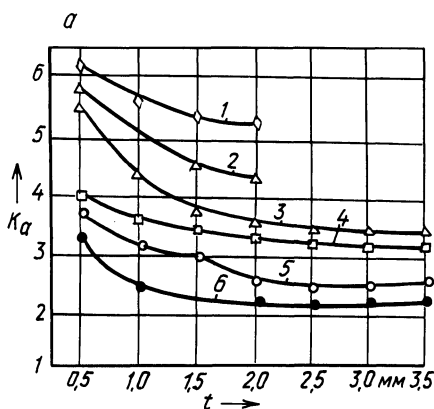


Рис. 4. Зависимость коэффициента усадки стружки по толщине, ширине (а, в) (условия обработки по рис. 2, а) и длине (б) (заготовка — сплав баббита Б83 и свинца С2, инструмент — сталь Р18;  $\gamma_r = 0$ ;  $\alpha_r = 10^\circ$ ;  $d = 53$  мм) от глубины резания при обработке инструментом:

1 — с самовращением; 2, 3 — с прерывистой режущей кромкой; 4 — с разнонаправленными  $\bar{v}_\tau$  и  $\bar{v}_s$ ; 5 — с непрерывной режущей кромкой; 6 — без вращения

Зависимости коэффициентов усадки стружки от глубины резания  $t$  (угла контакта) и подачи  $s$  (толщины срезаемого слоя) приведены на рис. 4 и 5. Аналогичные зависимости коэффициентов усадки стружки от глубины резания и подачи установлены многими исследователями при других методах обработки и объясняются следующими обстоятельствами. При снятии в процессе резания тонких стружек толщина среза соизмерима с радиусом округления режущей кромки. В этом случае резание происходит при отрицательных передних углах, а значит, и усадка стружки больше. С увеличением  $t$  и  $s$  угол резания уменьшается, что приводит к снижению степени деформации в зоне резания. В то же время с ростом  $t$  и  $s$  повышается и температура в зоне контакта передней поверхности инструмента со стружкой. В результате длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента уменьшается, что влечет за собой возрастание контактного давления и снижение коэффициента трения. Все эти изменения контактных характеристик приводят к уменьшению усадки

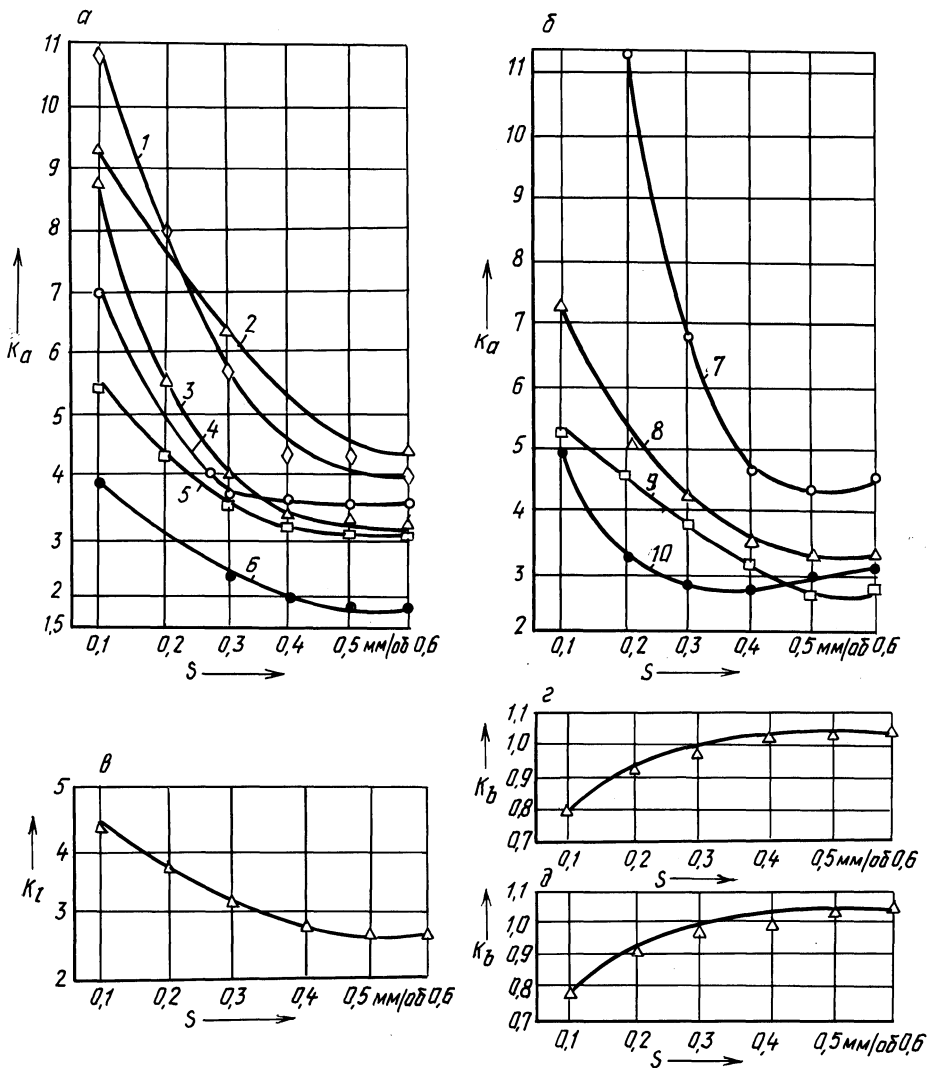


Рис. 5. Влияние подачи на коэффициенты усадки стружки по толщине (а, б) (условия обработки по рис. 2, а и б), длине (в) (условия обработки по рис. 2, б) и ширине (г, д) (условия обработки по рис. 2, а и б) при обработке инструментом: 1 – с самовращением; 2, 3 – с прерывистой режущей кромкой; 4 – с непрерывной режущей кромкой; 5 – с разнонаправленными  $\bar{v}_T$  и  $\bar{v}_S$ ; 6 – без вращения; 7, 8 – соответственно с непрерывной и прерывистой режущей кромкой; 9 – с разнонаправленными  $\bar{v}_T$  и  $\bar{v}_S$ ; 10 – без вращения

стружки. При дальнейшем увеличении толщины среза температура повышается менее интенсивно и падение  $k_a$  замедляется.

Таким образом, отличия в степени деформации срезаемого слоя, обусловленные направлением вращения инструмента и прерывистостью режущей кромки, незначительные, а характер зависимостей усадки стружки от элементов режима резания соответствует другим методам обработки, что позволяет рекомендовать для принудительно вращающегося инструмента с прерывистой кромкой наиболее благоприятные условия стружкообразования:  $v > 0,4$  м/с;  $v_r/v > 0,6$ ;  $s > 0,3$  мм/об;  $t \geq 1 \dots 1,5$  мм.

УДК 621.95.025.001

В.А. ПЛОТНИКОВ, М.Л. ЕРЕМЕНКО  
канд. техн. наук (БПИ)

### ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛЬЮ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ РОТАЦИОННОГО РАСТОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

Обработка ротационным резцом по сравнению с традиционным призматическим отличается повышенными силами резания. Это связано в большой степени с тем, что ротационному инструменту присущи относительно малые углы в плане и увеличенная длина контакта режущей кромки с обрабатываемой деталью.

Предложенная в работе [1] формула для определения угла контакта активной части режущей кромки резца с обрабатываемой деталью громоздка. Поэтому авторы данной работы предлагают следующее упрощенное выражение:

$$\cos \theta = 1 - \frac{t}{r \operatorname{cosec} \psi_B \cdot \sin \varphi_y}, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус резца;  $\psi_B$  — параметр вершины резца;  $\varphi_y$  — угол установки резца в горизонтальной плоскости.

Однако в этом уравнении не учитывается такой важный параметр, как диаметр растачиваемого отверстия, так что задача сводится к случаю обработки плоской поверхности.

Как видно из рис. 1, вершина  $B$  резца делит дугу контакта его режущей кромки на два участка:  $BC$ , играющий роль главной режущей кромки и характеризующийся углом контакта  $\theta$ , и  $BA$ , играющий роль вспомогательной режущей кромки и характеризующийся углом контакта  $\theta_1$ , который определяется с учетом подачи  $s$  из выражения:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{s \cos \varphi_y}{2r \cos \psi_B}. \quad (2)$$

Параметр вершины резца  $\psi_B$  можно определить, зная углы установки резца в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\varphi_y$  и  $\beta_y$  [2]: