

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. С. ТЕР-МАРКАРЯН

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ И ПРОЦЕССА  
 РЕЗАНИЯ БЕЗВЕРШИНЫМИ РЕЗЦАМИ

Безвершинные резцы, отличительной чертой которых является большой угол наклона режущей кромки, имеют ряд особенностей и преимуществ [1]: в отличие от обычных, они всегда работают в условиях свободного резания; вследствие большой ширины среза тангенциальная и радикальная составляющие усилий резания при одинаковых условиях обработки несколько больше, чем у обычных резцов; осевая составляющая направлена в обратную сторону, т. е. имеет отрицательное значение; заточка инструмента проще и производится по двум плоскостям; настройка в резцодержателе по оси вращения детали не требуется и в случае износа его можно поднять или опустить на величину изношенной части режущей пластины.

При работе безвершинным резцом, как впрочем и обычным, с углом наклона  $\lambda \neq 0$  [1], несоответствие рабочих (кинематических) и статических углов может достигнуть значительных величин, и поэтому наличие переходных зависимостей между ними при исследовании этих инструментов становится необходимым.

Исследования безвершинных резцов целесообразно проводить путем сопоставления их с резцами обычной геометрии, что, несомненно, выявит непосредственное влияние угла наклона режущей кромки и вершины резца на выходные параметры процесса резания.

Успешное сопоставление этих резцов возможно только при максимальном сохранении идентичности их геометрических параметров, для чего необходимо вывести соответствующие зависимости, учитывающие взаимосвязь между аналогичными углами указанных резцов.

Этим двум вопросам, в основном, посвящена данная работа.

На рис. 1. представлена схема определения этих зависимостей, откуда

$$\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \varphi; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi + \operatorname{tg}^2 \varphi'}} \quad (2)$$

Следовательно, при заданном угле  $\psi$  углы  $\varphi$  и  $\varphi'$  прямо пропорциональны, а при  $\varphi' = 0$  углы  $\psi$  и  $\lambda$  дополняют до  $90^\circ$ .

Для безвершинных резцов рабочий угол наклона режущей кромки ( $\psi_p$ ) можно определить, используя соответствующие зависимости  $\lambda$  [2] и уравнения (1) и (2).

$$\operatorname{tg} \psi_p = \left\{ \cos \varepsilon (\operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \varphi') + \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi' \right\}^2 - \cos \sigma_N \operatorname{tg}^2 \varphi (\operatorname{tg}^2 \varphi' + \operatorname{tg}^2 \psi) (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi')^2 \times \left\{ \cos \sigma_N (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi') \sqrt{\operatorname{tg}^2 \varphi' + \operatorname{tg}^2 \psi} \right\}^{-1}. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_N$  — проекция угла подъема винтовой траектории рабочего движения резца в нормальном сечении и определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \sigma_N = \frac{\operatorname{tg} \psi \sin \varepsilon \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \varphi'}}{\cos \varepsilon (\operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \varphi') + \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varphi'}.$$

где

$$\sin \varepsilon = \frac{p - r}{r \operatorname{tg} \varphi'};$$

$p$  — радиус рассматриваемой окружности на поверхности резания;  
 $r$  — радиус обработанной поверхности.

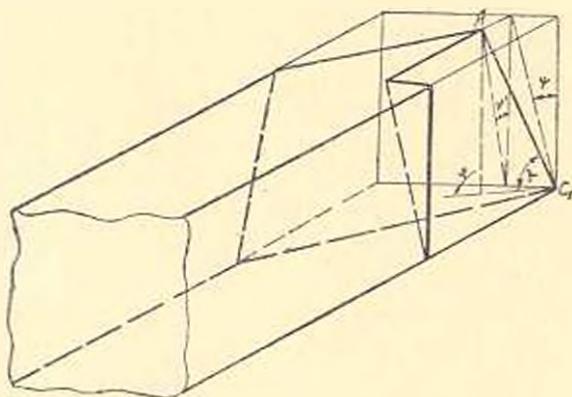


Рис. 1. Схема определения зависимостей между углами  $\psi_p \sim \varphi$  и  $\psi \sim \lambda$ .  $AC_1$  — режущая кромка инструмента;  $\varphi'$  и  $\psi$  — соответственно угол атаки и угол наклона режущей кромки обычного резца;  $\varphi$  и  $\lambda$  — соответственно главный угол в плане и угол наклона режущей кромки обычного резца.

Зависимость (3) выведена без учета влияния подачи и показывает, что величина рабочего угла наклона режущей кромки вдоль последней переменна: она растет при переходе от обработанной поверхности к обрабатываемой. Это результат превышения или занижения точек режущей кромки (кроме одной) относительно оси вращения детали.

Прежде чем установить взаимосвязь между остальными углами, надо уточнить, в частности для  $\alpha$  и  $\gamma$ , на каких плоскостях и направлениях они измеряются, поскольку от этого зависит их действительная величина. Подобное уточнение поможет также выявить непосредственное влияние угла наклона режущей кромки на процесс резания от его косвенного влияния.

Направление измерения рабочего заднего угла  $\alpha_p$  справедливо связывают [3] с направлением вектора истинной скорости резания  $V_n$ . Поэтому у безвершинных резцов принято  $\alpha_p$  измерять в секущей плоскости, параллельной оси вращения детали и проходящей через  $V_n$  в данной точке. Тогда  $\alpha_p$  будет представлять собой угол, заключенный между следом указанной плоскости на заднюю грань инструмента и вектором  $V_n$ . Поскольку направление вектора  $V_n$  не постоянно вдоль режущей кромки, то переменной является и величина рабочего заднего угла, которая в произвольной точке на режущей кромке определяется по формуле [4]. Однако в этой работе не учтены влияние подачи  $s$  и переменность угла  $\psi_p$  вдоль режущей кромки, величина которого, как выяснилось, может изменяться в довольно широких пределах.

С учетом отмеченного, выведенная нами формула по определению величины рабочего заднего угла в произвольной точке  $\alpha_p$  дает ее более точное значение:

$$\operatorname{tg} \alpha_{p_i} = \frac{2\rho (\operatorname{tg} \alpha_n \operatorname{tg} \psi_{p_i} - \operatorname{tg} \theta_i - \operatorname{tg} \varphi') - s \operatorname{tg} \alpha_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta_i}}{s (\operatorname{tg} \alpha_n \operatorname{tg} \psi_{p_i} - \operatorname{tg} \theta_i - \operatorname{tg} \varphi') + 2\rho \operatorname{tg} \alpha_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta_i}}, \quad (4)$$

где

$$\operatorname{tg} \theta_i = \frac{\cos \varphi' \sqrt{\rho^2 - r^2} - r \sin \varphi'}{\sin \varphi' \sqrt{\rho^2 - r^2} + r \cos \varphi'};$$

$\alpha_n$  — статический задний угол безвершинного резца.

Как видно из (4), угол  $\alpha_p$  растет с уменьшением  $\rho$ , т. е. с переходом от обрабатываемой поверхности к обработанной.

В некоторых случаях необходимо знать величину статических задних углов в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке  $\alpha_N$ , и в плоскости, перпендикулярной к проекции режущей кромки на основную плоскость  $\alpha$ .

Схема определения зависимостей между вышеуказанными углами представлена на рис. 2, откуда:

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \varphi'}{\operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \varphi'}}; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha_N \cos \psi \cos \varphi'. \quad (6)$$

Вопрос о направлении измерения рабочего переднего угла  $\gamma_p$  при работе инструментом с  $\lambda \neq 0$  окончательно не решен. Исследователи придерживаются разных взглядов [1; 3; 6; 7], но большинство из них принимает точку зрения Г. И. Грановского [3], который связывает направление измерения  $\gamma_p$  с направлением схода стружки по передней поверхности инструмента. Подобный подход следует считать правильным, т. к. сила трения на передней поверхности действует в этом направлении, кроме того, за формирование зоны резания ответственна та часть режущего клина, которая получается при пересечении последнего с плоскостью, совпадающей с направлением схода стружки. В этом случае  $\gamma_p$  определяется как угол, заключенный между следом этой плоскости на переднюю поверхность и следом плоскости  $Q$  на ту же плоскость (рис. 2).

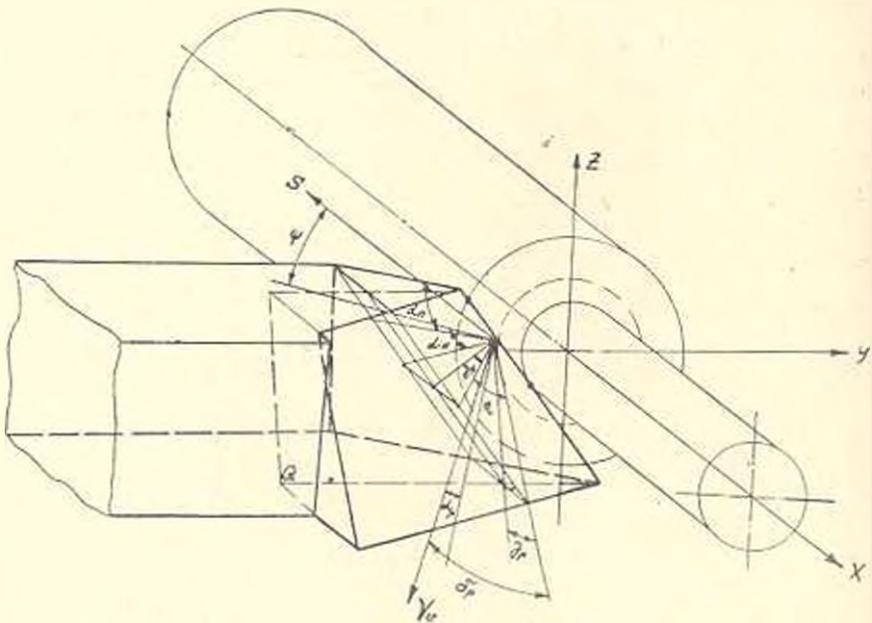


Рис. 2. Статические и кинематические углы безвершинного реза.

Плоскость  $Q$ , которая проходит через режущую кромку, а ее след на основную плоскость перпендикулярен к направлению продольной подачи, служит началом отсчета передних углов.

Подобная постановка вопроса вытекает из того, что если взять крайнее расположение безвершинного реза, когда его режущая кромка параллельна основной плоскости, то плоскость  $Q$  займет положение, аналогичное той плоскости, между которой и передней поверхностью инструмента с  $\lambda = 0$  измеряется передний угол.

Условимся, что если передняя поверхность безвершинного реза при его вышеуказанном расположении находится ниже плоскости  $Q$ , то образуется положительный передний угол, а если выше — отрицательный.

Необходимо отметить, что у безвершинных резцов статический передний угол целесообразно измерять в направлении нормали к режущей кромке  $\gamma_N$ , т. е. при измерении этого угла в плоскости, перпендикулярной к проекции режущей кромки на основную плоскость и теряется его функциональный смысл.

Из схемы (рис. 2) нетрудно найти, что

$$\operatorname{tg} \tau_r = \frac{\operatorname{tg} \tau_N}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \tau_N)}}; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \tau_N = \operatorname{tg} \tau \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \tau}{1 + \operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \tau}}. \quad (8)$$

Как следует из (7), для определения  $\tau_r$  необходимо знать значение угла схода стружки на передней поверхности инструмента  $\eta$  в интересующей нас точке вдоль режущей кромки.

По нашему мнению, направление этого схода связано с направлением вектора истинной скорости резания  $\vec{V}_r$ . Сказанное имеет реальную основу, т. е. любая точка на поверхности вращающегося цилиндра стремится сойти с поверхности по касательной, т. е. по направлению вектора скорости вращения. По этому же направлению должны сойти и частицы стружки, при условии, что рабочий угол резания инструмента  $\delta_p \rightarrow 0$ .

Прямым доказательством наших рассуждений является процесс косоугольного свободного строгания с инструментом  $\delta_p \rightarrow 0$  (если представить себе такой инструмент). При этом, исходя из условия  $\lambda = \eta$ , направление схода стружки и вектор скорости резания лежат на одной прямой. Кроме того, при описанной схеме обеспечивается минимальная затрата энергии на отвод срезанной стружки, т. е. данный процесс происходит без принудительного изменения ее направления. Следовательно, при  $\delta_p \rightarrow 0$  направление схода стружки должно обязательно совпадать с направлением  $\vec{V}_r$ , как более выгодное в энергетическом отношении.

Заметим, что вышеописанная схема практически не имеет смысла, т. е. создание подобных инструментов нереально. Однако, с целью аналитического определения угла  $\eta$ , эту схему с некоторыми допущениями можно распространить на такие инструменты, у которых наблюдаются относительно небольшие значения  $\delta_p$ . Подобным условиям в определенной мере удовлетворяет безвершинный резец,  $\delta_p$  которого определяется формулой, предложенной в работе [4]. Однако в этой формуле допущена такая же неточность, что и в формуле для определения  $\delta_p$ , т. е. не учтены влияние  $s$  и переменность  $\psi_p$  вдоль режущей кромки в процессе резания. Исходя из сказанного, точнее будет упомянутую формулу представить в виде

$$\operatorname{tg} \delta_{p1} = \frac{2\pi r \operatorname{tg} \psi_p \cos \psi_1 - s}{2\pi r + s \cos \psi_1 \operatorname{tg} \psi_p}. \quad (9)$$

Результаты расчетов по этой формуле показывают, что у безвершинного реза угол  $\delta_0$  — величина переменная, причем, на обработанной поверхности он принимает свое минимальное значение —  $23^\circ 48'$  (при задании  $\delta_N = 105^\circ$ ).

Таким образом, применение этих резцов обеспечивает более чем четырехкратное кинетическое заострение, что дает нам право с некоторыми допущениями использовать вышеуказанную схему для без-

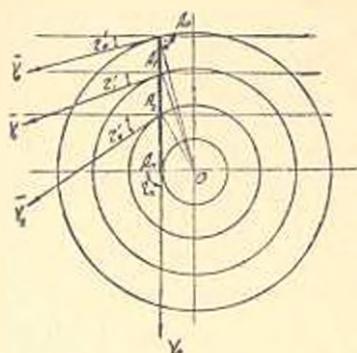


Рис. 3. Схема определения угла схода стружки на передней поверхности безвершинного реза.

вершинных резцов (рис. 3). На рис. 3 через различные точки  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$  режущей кромки  $AA_n$ , лежащие на поверхности резания, проведены касательные к окружностям, которым принадлежат указанные точки. Фронтальные проекции углов схода  $\varphi'$  на различных уровнях режущей кромки, заключенных между соответствующими векторами скоростей и нормалью к режущей кромке, можно найти из треугольников  $A_0A_nO, A_1A_nO, A_2A_nO$  и т. д., т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{r}{\sqrt{\rho^2 - r^2}}.$$

Имея величину  $\varphi'$ , нетрудно найти его истинную величину на передней поверхности инструмента, которая отклонена от фронтальной плоскости на углы  $\psi$  и  $\gamma_N$ , т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{r \cos \psi}{\cos \gamma_N \sqrt{\rho^2 - r^2}}. \quad (10)$$

Анализируя полученную формулу, можно заключить, что угол схода стружки вдоль режущей кромки переменный, причем, с переходом от обрабатываемой поверхности к обработанной  $\eta$  возрастает, принимая свое максимальное значение —  $90^\circ$ . Непостоянством значения  $\eta$  объясняется завивание стружки, образующейся при обработке безвершинным резцом, причем, чем ощутимее изменение  $\eta$ , тем меньше угол подъема лунки завитой стружки.

С уменьшением угла наклона режущей кромки от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  угол схода возрастает от  $0^\circ$  до своего максимального значения. Увеличение  $\eta$  наблюдается также с уменьшением глубины резания и  $\gamma_N$  (при его отрицательных значениях), что согласуется с экспериментальными данными исследований [8: 1].

Недостатком выведенной формулы (10) является то, что она полностью не отражает физическую сторону воздействия входящих в нее геометрических параметров на угол схода стружки. Поэтому наблюдается некоторое расхождение между экспериментальными и расчетными данными при больших значениях угла  $\psi$  и положительных значе-

ниях  $\gamma_N$ . Однако, если учесть то, что у безвершинных резцов, исходя из конструктивных соображений,  $\gamma_N$  не принимает положительных значений и колеблется в весьма узких пределах (от  $0^\circ$  до  $-15^\circ$ , а  $\psi = 20^\circ \div 30^\circ$ ), то все указанные недостатки практически не отражаются на точности формулы. Так, непосредственное измерение угла схода на передней поверхности безвершинного резца (при условии  $l = 1$  мм,  $R = 18$  мм,  $\psi = 25^\circ$ ,  $\gamma_N = -15^\circ$ , материал Сталь 40X) показало, что на обрабатываемой поверхности  $\gamma_{\max} = 73^\circ$ , а на обработанной  $\gamma_{\min} = 84^\circ$  в то время, как расчетные значения тех же углов соответственно, но равны  $69^\circ 40'$  и  $90^\circ$ . Такое расхождение между расчетными и экспериментальными данными объясняется тем, что сходящая стружка в процессе резания сохраняет свою целостность, и, тем самым, вносит свою корректировку на предельные значения  $\eta$ . Так,  $\gamma_{\min}$  стремится увеличить  $\gamma_{\max}$ , в то время, как сам подвергается противоположному воздействию последнего. В результате стружка сходит в каком-то среднем направлении, и поэтому расчетное значение угла схода на обрабатываемой поверхности несколько меньше экспериментального значения того же угла, а на обработанной поверхности — наоборот. Следовательно, если взять средние значения данных углов, то получится довольно точное совпадение ( $\gamma_{\text{расч. ср.}} = 79^\circ 50'$ ,  $\gamma_{\text{эксп. ср.}} = 78^\circ 30'$ ).

Рабочую длину округленной части  $P_p$  безвершинного резца с радиусом округления  $R_N$  необходимо измерять по направлению схода стружки по той же причине, что и  $\gamma_N$ . В этом случае она намного отличается от своего статического значения, измеренного в направлении нормали к режущей кромке, т. к. представляет собой не полу-круг, а половину эллипса с периметром

$$2P_{p_i} = \frac{=R_N \sqrt{2(1 + \cos^2 \gamma_u)}}{\cos \gamma_i} \quad (11)$$

Если придерживаться мнения [5], что условия деформирования в зоне резания, помимо других факторов, зависят от длины  $P_p$  независимо от ее формы, то для безвершинных резцов можно ввести понятие рабочего радиуса округления  $R_p$ , величина которого будет такой же, что и у окружности с периметром, равным периметру указанного эллипса. Учитывая сказанное, нетрудно найти

$$R_{p_i} = \frac{R_N \sqrt{2(1 + \cos^2 \gamma_u)}}{2 \cos \gamma_i} \quad (12)$$

Как следует из (12), величина  $R_p$  вдоль режущей кромки переменна и увеличивается с переходом от обработанной поверхности к обрабатываемой. При необходимости конкретизировать его значение, можно использовать среднее значение угла схода стружки. Так, при указанных выше условиях, когда  $\gamma_{cp} = 79^\circ 50'$   $R_{p_{cp}}$  больше  $R_N$  более чем в четыре раза, а это значит, что степень влияния радиуса округления

безвершинного резца на процесс резания больше, чем у резцов обычной конструкции.

Таким образом, переменность вдоль режущей кромки рабочих углов безвершинного резца, а также его вышеуказанные особенности должны существенно изменять условия стружкообразования, что найдет свое отражение в изменении степени деформации срезанной стружки и характеристик качества обработанной поверхности.

Эти предложения подверглись аналитическому и экспериментальному исследованию. Для сопоставления изучался также процесс резания обычными резцами, имеющими оптимальные для данных условий резания параметры. Эксперименты проводились на сталях 20Х, 40Х и У8А в широком диапазоне изменения режимного поля и геометрии инструмента.

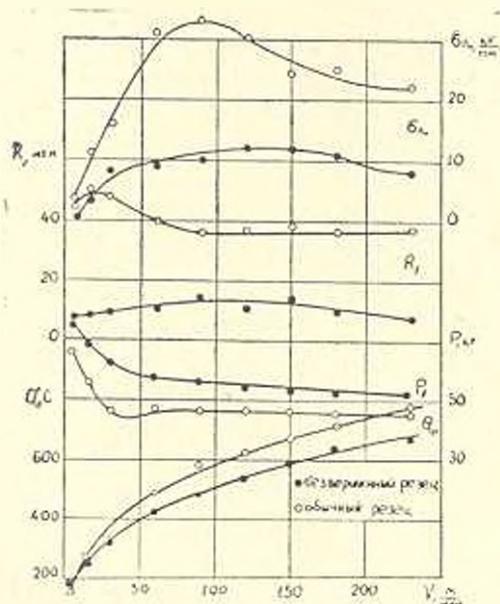


Рис. 4. Влияние скорости резания на некоторые выходные параметры процесса резания при точении безвершинным и обычными резцами стали 20Х при  $s = 0,195$  мм/об,  $t = 1,25$  мм.

Металлографический анализ корней стружки, а также поля микротвердости, показывает, что с переходом от обработанной поверхности к обрабатываемой и от обычного инструмента к безвершинному степень деформации стружки уменьшается, а угол сдвига увеличивается, уменьшая зону резания.

Что касается характеристик качества обработанной поверхности, то у обычных резцов микротвердость поверхности  $H_n$  и глубина ее залегания  $h$  при изменении скорости резания (рис. 4) соответственно больше на 75 и 25%, тангенциальные остаточные напряжения, действующие на поверхности  $H_{tg}$ , выше в 2—3 раза, а высота микронеровностей  $R_z$  выше на 2—3 класса.

В последнем случае выгодно выделяется независимость  $R_2$  от изменения скорости резания и, отчасти, от подачи, что имеет определенную практическую ценность. Ощутимая разница между значениями  $\varepsilon_n$  объясняется отсутствием вершины, возле которой концентрируется большое количество тепла, локальностью которого, в основном, определяется величиной  $\varepsilon_{n_0}$ , т. к. средняя температура контакта  $\theta_{cp}$  при обоих видах инструментов мало отличается. Результаты температурных и динамических исследований показали, что при точении безвершинным резцом  $\theta_{cp}$  несколько ниже, а усилие резания, как и ожидалось, несколько больше, чем у обычных резцов.

Небезынтересно отметить, что увеличение угла  $\varphi'$  приводит к интенсивному спаду радиальной составляющей усилия резания, а при  $\varphi' = 45^\circ$   $P_r = 0$ .

Из остальных геометрических параметров исследуемого инструмента определенный интерес представляет угол  $\psi$ , оптимальная величина которого находится в пределах  $30-35^\circ$ , т. к. в этом интервале  $R_2$ ,  $H_{n_0}$ ,  $h$ ,  $\varepsilon_{n_0}$  и др. принимают свои минимальные значения. Оптимальными являются также значения заднего угла  $\alpha_n = 36-38^\circ$ . Что касается остальных закономерностей, то тут проявляется ожидаемая тенденция, а именно: с уменьшением  $\gamma_N$  и с увеличением радиуса округления режущей кромки, а также величины радиального износа, наблюдается прирост почти всех выходных параметров процесса резания.

Резюмируя все изложенное, можно заключить, что:

1. Все рабочие углы безвершинных резцов по величине значительно отличаются от их статических значений и вдоль режущей кромки колеблются в довольно широких пределах;

2. Безвершинные резцы обеспечивают малую шероховатость без принудительного применения малопродуктивных подач и низкое напряженное состояние подповерхностных слоев в широком диапазоне режимного поля.

Поступило 19. IX. 1977

И. И. ՏԵՐ-ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ

ԿՏՐՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ԵՎ ԿԻՆԵՄԱՏԻԿԱՅԻ ՈՐՈՇ  
Ա.Ռ.ԱՆՁԼԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԱՆԳԱԳԱԹ ԿՏՐԻՉՆԵՐՈՎ  
ԱՇԽԱՏԵԼԻՍ

Ա Վ Փ Ի Ն Փ Ի Ն Ը Մ

Հողվածուժ ճշտված են անդադաթ կտրիչների կինեմատիկ անկյունների մեծությունները որոշող միջին այժմե հղած կապերը, բացահայտվել են նշված և հասարակ կտրիչների նմանատիպ անկյունների անցումային կապերը, ինչ-

պես նաև փոխադարձ կապը տաշեղի վազքի անկյան և կտրիչի մի քանի երկրաչափական պարամետրների միջև անգագաթ կտրիչներով աշխատելիս: Պարզվել է, որ ինչպես վազքի, այնպես էլ բոլոր կինեմատիկ անկյունները անդադաթ կտրիչի կտրող եզրի երկարությամբ փոփոխական են: Ելնելով փորձնական տվյալներից, կարելի է եզրակացնել, որ անդադաթ կտրիչներով աշխատելիս տաշեղի դեֆորմացիայի աստիճանը, կոնտակտի միջին շերտա-տիճանը, միկրոսահարթությունների բարձրությունը, ինչպես նաև մակերևու-թային շերտի լարվածային վիճակը ավելի ցած են՝ քան հասարակ կտրիչ-ներով աշխատելիս:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бобров В. Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. Машгыз, М., 1962.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М., 1975.
3. Грановский Г. И. Кинематика резания. Машгыз, М., 1948.
4. Касьян М. В., Минасян Г. С. Особенности резания титановых сплавов безвершинными резами. Изд-во АН АрмССР, Ереван, 1975.
5. Касьян М. В., Маркарян Г. К. Высокое качество поверхности (упрочнение)—основа повышения надежности. Ереван, 1961.
6. Розенберг А. М., Холфен Р. В. К вопросу о действительном направлении скола стружки при косозубном резании. Резание и инструмент. Вып. 16, 1976. Харьковский политехнический институт.
7. Розенберг А. М. Механика процесса свободного резания. Труды ленинградской конференции по резанию металлов, 1940.
8. Sakuma Ketzō, Onikura Hiromichi. Cutting mechanism of skiving. Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ., 1976, 35, № 3, 169—185.