

УДК 621.9: 658.5

Э.С. Христафорян, д-р техн. наук, проф., А.Л. Аршакян,
С.Ш. Христафорян, д-р техн. наук, проф.
ГИУА, г.Ереван, РА

РАБОЧИЕ УГЛЫ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ РАСТАЧИВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРУТИЛЬНЫХ УЗК И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ УГЛОМ λ

В работе рассматриваются рабочие углы режущего клина при растачивании с применением крутильных УЗК и отрицательным углом λ . Показано, что принудительные ультразвуковые колебания режущего клина, а также его расположение по отношению к оси заготовки и вибрации различной природы значительно влияют на производительность углов резания клина. Приведены зависимости, учитывающие эти изменения.

Ключевые слова: углы, режущий клин, колебания, режимы резания.

Применение способа резания с принудительными ультразвуковыми колебаниями (УЗК) в различных технологических процессах доказала высокую, проявляющуюся в различных формах, эффективность способа. Однако, в отличие от точения, этот способ при растачивании, практически, не рассмотрен, несмотря на то, что способ широко применяется при развертывании отверстий, нарезании внутренней резьбы, сверлении и др. процессах, в первую очередь, при обработке труднообрабатываемых материалов. Разумеется кроме констатации высокой эффективности применения УЗК в этих процессах обработки необходимо провести и соответствующие теоретические исследования, которые помогут в деле поиска решений для оптимизации этих технологических процессов. Рассмотрим на примере растачивания кинематические особенности влияния крутильных УЗК и высокочастотных вибраций режущего клина на его рабочие углы.

Примем, что режущий клин, имеющий углы $\gamma_c, \alpha_c, \lambda > 0$ установлен выше оси растачиваемой детали на величину h_y , то есть ось крутильных колебаний O_1 выше оси детали O на величину e_z, e_y (рис.1а), ввиду чего передний и задние углы режущего клина будут отличаться от углов его заточки. Воспользуемся принципами ортогонального проектирования [1,2] и определим σ_N - угол коорректировки. Заметим, что σ_N не постоянная величина, т. к. истинная величина вектора \vec{V} состоит из трех составляющих:

- вектор скорости главного вращательного движения $\vec{V}^b = 2\pi r n$ [мм/мин] (1)

- вектор скорости подачи режущего клина $\vec{V}^s = nS$ [мм/мин] (2)

- вектор скорости, обусловленной УЗК или вибрациями режущего клина \vec{V}^k .

$$\vec{V}^k = \tau_a \cdot \omega \cdot \cos \omega t [\text{рад/с}] \Rightarrow V^k = \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t / 60 [\text{рад/мин}]$$
 (3)

где ρ - радиус-вектор обрабатываемой поверхности [мм], n - число оборотов детали [об/мин], S - подача режущего клина, ρ_k - радиус-вектор колебательного движения, τ_a - амплитуда УЗК режущего клина [рад], ω - круговая частота УЗК [с⁻¹],

Для облегчения восприятия и представления в планах скоростей не представлены линии построений и не учтены реальные масштабы проекций скоростей. При реальном представлении имело бы место чрезвычайное усложнение схемы.

Используя диапазоны изменения рабочих углов имеем:

$$\gamma_p = \gamma_c + \sigma_N; \quad \alpha_p^N = \alpha_c - \sigma_N; \quad \operatorname{tg} \alpha_p = \operatorname{tg}(\alpha_c - \sigma_N) \cos \lambda_p; \quad \operatorname{tg} \lambda_p = V_T/V_N \quad (4)$$

На основе рис.1б

$$\varepsilon_{11} = \arcsin h/\rho = \arcsin (h_y + l \cdot \sin \lambda)/\rho \quad (5)$$

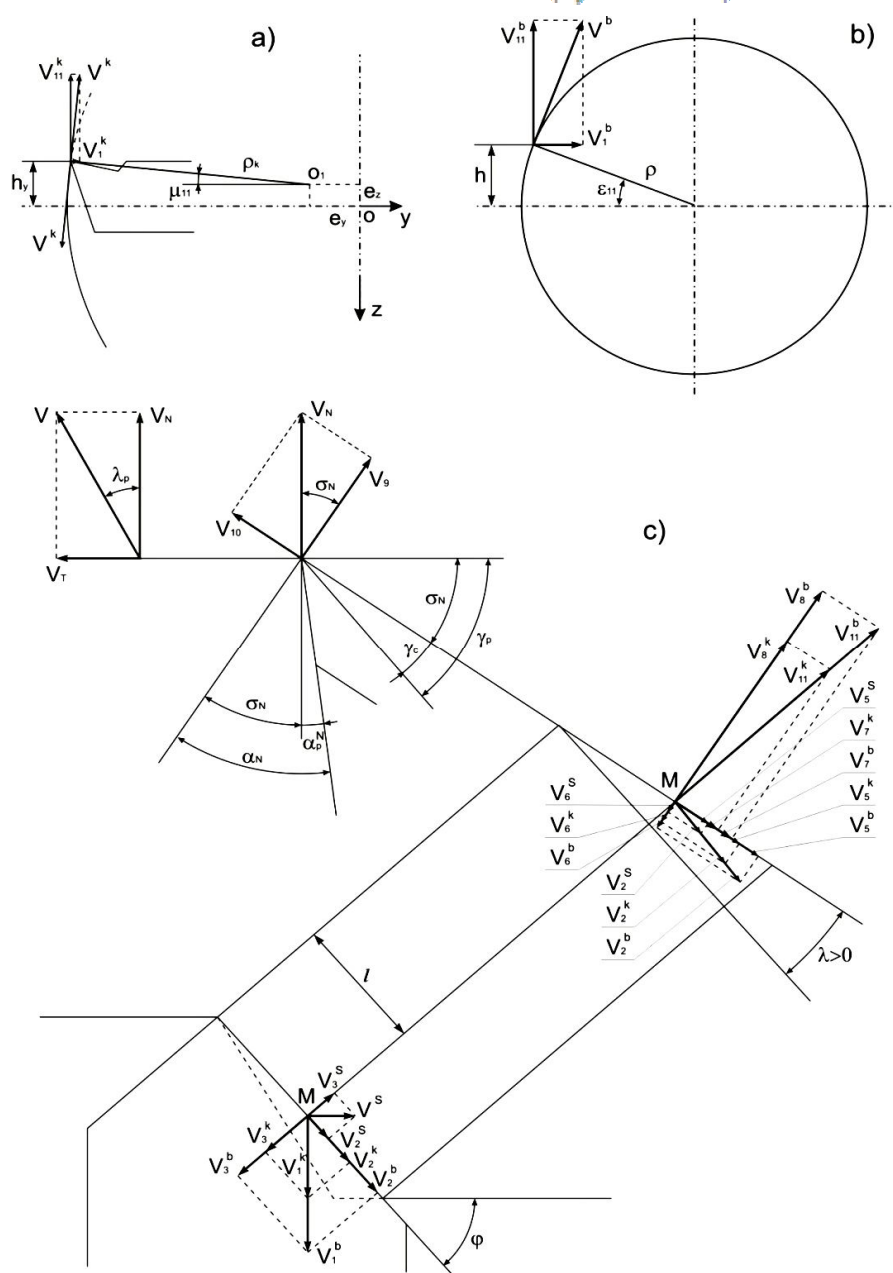
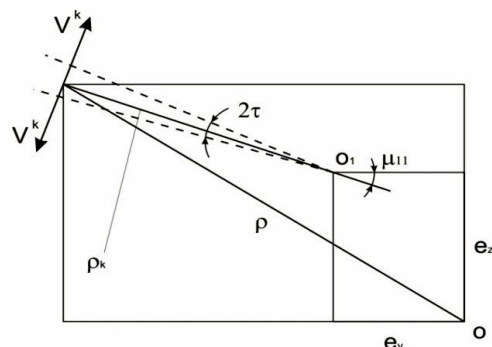


Рис. 1. План скоростей

$$\left. \begin{aligned} V_{11}^b &= V^b \cdot \cos \varepsilon_{11} \\ V_1^b &= V^b \cdot \sin \varepsilon_{11} \\ V_2^b &= V_1^b \sin \varphi = V^b \cdot \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \\ V_3^b &= V_1^b \cos \varphi = V^b \cdot \sin \varepsilon_{11} \cdot \cos \varphi \\ V_5^b &= V_2^b \cos \lambda = V^b \cdot \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda \\ V_6^b &= V_2^b \sin \lambda = V^b \cdot \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda \\ V_7^b &= V_{11}^b \sin \lambda = V^b \cdot \cos \varepsilon_{11} \cdot \sin \lambda \\ V_8^b &= V_{11}^b \cos \lambda = V^b \cdot \cos \varepsilon_{11} \cdot \cos \lambda \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} V_2^S &= V^S \cos \varphi \\ V_3^S &= V^S \sin \varphi \\ V_5^S &= V_2^S \cos \lambda = V^S \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ V_6^S &= V_2^S \sin \lambda = V^S \cos \varphi \cdot \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рис. 2. Схема определения ρ_k, μ_{11}, τ

Радиус-вектор колебательного движения ρ_k , угол отклонения от горизонтальной плоскости μ_{11} и угол отклонения от УЗК τ будут

$$\rho_k = (\rho \cdot \cos \varepsilon_{11} - e_y) / \cos \mu_{11} \quad (8)$$

$$\mu_{11} = \arctg[(h - e_z) / (\rho \cdot \cos \varepsilon_{11} - e_y)] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \tau &= a / \rho_k = A \sin \omega t / \rho_k, \text{ следовательно} \\ \tau &= \arctg(A \sin \omega t / \rho_k) \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда выражение (6) представится как (11) и при этом V_9, V_{10}, V_N и V_T будут равны (12)

$$\left. \begin{aligned} V_{11}^k &= V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \\ V_1^k &= V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \\ V_2^k &= V_1^k \sin \varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin \varphi \\ V_3^k &= V_1^k \cos \varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cos \varphi \\ V_5^k &= V_2^k \cos \lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin \varphi \cos \lambda \\ V_6^k &= V_2^k \sin \lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin \varphi \sin \lambda \\ V_7^k &= V_{11}^k \sin \lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \sin \lambda \\ V_8^k &= V_{11}^k \cos \lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cos \lambda \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} V_9 &= V_8^b + V_8^k + V_6^k - V_6^b - V_6^S \\ V_{10} &= V_3^S - V_3^k - V_3^b \\ V_N &= V_{10} / \sin \sigma_N \\ V_T &= V_5^b + V_5^S + V_7^b + V_7^k + V_7^S \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Подставляя (1-3, 6, 7 и 11) в (12) и учитывая, что $\operatorname{ctg} \sigma_N = V_9 / V_{10}$ получим

$$\begin{aligned} V_9 &= V^b \cos \varepsilon_{11} \cdot \cos \lambda + V^k \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) \cdot \cos \lambda - V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda - V^S \cos \varphi \cdot \sin \lambda - V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda = \\ &= [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \cos \lambda - S \cdot n \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda - \\ &= [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} V_{10} &= V^S \sin \varphi - V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \cos \varphi - V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \cos \varphi = \\ &= S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

$$\operatorname{ctg} \sigma_N = \frac{[2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \cos \lambda}{S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos \varphi} -$$

$$\frac{Sn \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda + [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda}{Sn \cdot \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi} \quad (15)$$

$$V_N = \{Sn \cdot \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi\} / \sin \sigma_N \quad (16)$$

$$V_T = V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + V^s \cos \varphi \cdot \cos \lambda + V^b \cos \varepsilon_{11} \cdot \sin \lambda + V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \lambda [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + Sn \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda [2\pi \rho n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \lambda \quad (17)$$

Основываясь на (16) и (17) преобразуем (4), тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \lambda_p = & \frac{\{Sn \cdot \cos \varphi + [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60]\} \cos \lambda \cdot \sin \sigma_N}{Sn \cdot \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi} + \\ & + \frac{[2\pi \rho n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \lambda \cdot \sin \sigma_N}{Sn \cdot \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi} \end{aligned} \quad (18)$$

Однако приведенная (рис.1,2) схема не привлекательна, т. к. зависимость (14) с учетом, что отношение V^s/V^b для исследуемого диапазона режимов резания должна быть определенной величиной, то σ_N уменьшит передний угол и увеличит задний угол режущего клина. Одновременно из формулы (15) видно, что со снижением величин $n, h_y, \rho, \varepsilon$ уменьшаются величины ε_{11} и $\sin \varepsilon_{11}$, это приведет к тому, что отмеченный отрицательный эффект σ_N снизится и при определенных значениях $n, h_y, \rho, \varepsilon$ станет или незначительным или приведет к положительному эффекту роста переднего угла клина. Но такого эффекта трудно будет достигнуть исходя из конструктивных соображений. Для лучшего представления возможного варианта рассмотрим случаи, когда ось колебательных движений находится в оставшихся трех четвертях сечения (рис.3).

Обсудим в зависимости (9) вопрос угла μ_{11} , когда $e_z < h$, $e_z > h$, $e_z = h$. Заметим, что при $e_z = h$, $\mu_{11} = 0$, а различие в условиях $e_z < h$ и $e_z > h$, заключается в том, что в первом случае исследуемая точка выше оси O_I , а во втором случае ниже оси, что с позиций математики равнозначно изменению знака угла μ_{11} . Учитывая, что перемена знака симметрично изменяет только знак угла μ_{11} , а отмеченные выше условия ($e_z < h$ и $e_z > h$) в параметрическом виде не влияют на величину угла μ_{11} , оно не влияет на величину проекции и направление V_{11}^k , а проекция V_1^k изменит только свое направление на противоположное. Но это изменение будет учтено функцией \sin , которая меняет свой знак при изменении знака аргумента в диапазоне $[-90^\circ; +90^\circ]$, а вне этого диапазона за счет зависимостей при-ведения аргумента не будет иметь физического эффекта. Основываясь на приведенном можно заключить, что изменение знака угла μ_{11} угла при $e_z < h$, $e_z > h$, $e_z = h$ учитывается в зависимости (11) и по этой причине этот вопрос в дальнейшем не будет обсуждаться.

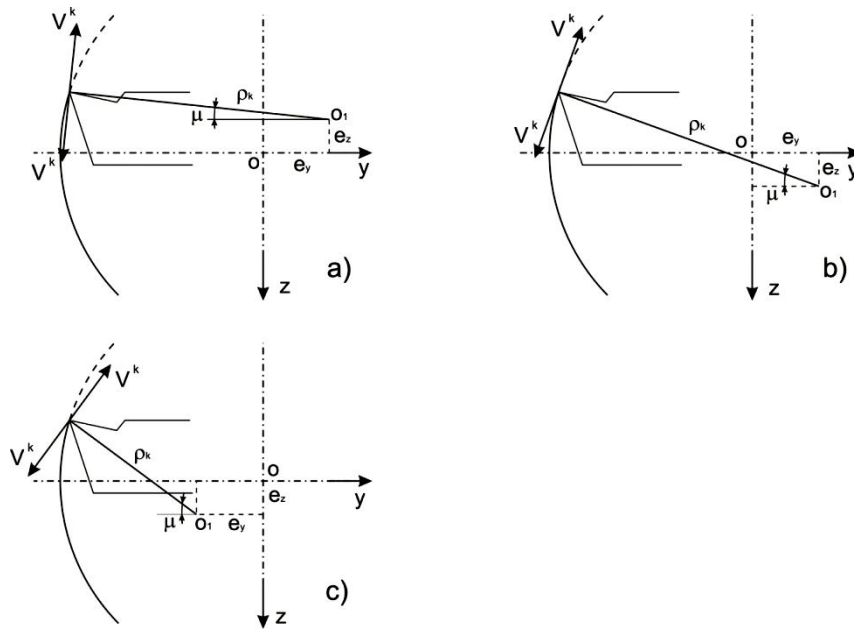


Рис. 3. Схемы, когда оси колебательных движений находятся в остальных трех четвертях поперечного сечения

В итоге увеличения радиус-вектора колебаний увеличится величина вектора скорости колебаний. Так как $\mu_{21} < \mu_{11}$ и $\cos(\mu_{21} + \tau) < \cos(\mu_{11} + \tau)$, то составляющие V_{11}^k увеличатся, а V_1^k снизится, т. к. $\sin(\mu_{21} + \tau) < \sin(\mu_{11} + \tau)$. Но снижение величины V_1^k частично скомпенсируется увеличением вектора V^k . Рост составляющей V_{11}^k приведет к увеличению составляющих V_7^k и V_8^k , а составляющие V_2^k и V_3^k снизятся незначительно за счет малого изменения составляющей V_1^k , что в свою очередь приведет к незначительному изменению составляющих V_5^k и V_6^k . Как результат отмеченного будет иметь место рост составляющих V_9 и V_T и незначительное снижение составляющей V_{10} , что приведет к снижению угла σ_N . Но изменение V_N будет небольшим, т. к. снижение составляющей V_{10} частично компенсируется снижением $\sin \sigma_N$ в итоге снижения σ_N . При этом увеличение V_T с одновременным снижением V_N приведет к увеличению λ_p . Следовательно данная схема приводит к более меньшему отклонению углов γ_p, α_p и большему отклонению λ_p , в сравнении со схемой на рисунке 2.1а.

Случай схемы рис. 3в. В этом случае опять таки рассматривается увеличение радиус-вектора вибрационных движений в сравнении с рисунком 3а. Однако учитывая, что $\cos(\mu_{14} + \tau) < \cos(\mu_{11} + \tau) < \cos(\mu_{12} + \tau)$, и $\sin(\mu_{14} + \tau) > \sin(\mu_{11} + \tau) > \sin(\mu_{12} + \tau)$, существенно возрастет величина составляющей V^k , а снижение величины V_{11}^k частично будет компенсировано ростом величины V^k . Точно также в предыдущем случае рост V_1^k и снижение V_{11}^k приведет к увеличению V_2^k и V_3^k и следовательно V_7^k и V_8^k и малому снижению V_5^k и V_6^k . Это приведет к увеличению V_9 и V_T и снижению V_{10} , следовательно к снижению σ_N , а V_N как и в предыдущем случае изменится мало, но λ_p возрастет.

Эта схема по своему действию на γ_p, α_p и λ_p подобно представленному на рис.3а.

Вернемся к схемам на рис. 3 и проведем их сравнение со схемой, представленной на рис. 2.1а с позиций углов γ_p, α_p и λ_p . Учитывая, что зависимости (6,7,11-18) не изменятся при переходе к схемам на рис. 2.3.

Случай схемы рис. 3а.

Случай схемы на рис. 3б. Эта схема в сущности представляет собой промежуточное между схемами рис. 3а и 3в. Надо отметить, что как в данной схеме, так и в выше рассмотренных изменение угла μ и радиус вектора ρ_k зависят от e_z и e_y . Их изменение влияет на положение оси принудительных УЗК O_I , которая приводит к изменению σ_N и λ_p . Одним из возможных результатов таких изменений представляется выбор таких e_z и e_y , что единственной разницей с представленной схемой на рис. 1а будет большая величина колебательного вектора V^k за счет большего ρ_k , а угол μ будет неизменным. В этом случае произойдет увеличение σ_N , что приведет к большему отклонению γ_p и α_p , а λ_p изменится не существенно.

Столь же подробно рассмотрены случаи, когда у режущего клина угол λ положительный и вершина клина находится на расстоянии h_y ниже оси детали.

Согласно приведенным данным можно утверждать, что правильное расположение оси принудительных УЗК O_I , которая приводит к изменению σ_N и λ_p , может привести к явному изменению рабочих углов режущего клина, что, в свою очередь, вызовет изменения в процессе стружкообразования. Следовательно, при одних и тех же углах заточки режущего клина можно программировать процесс резания при растачивании таким образом, чтобы улучшив процесс стружкообразования снизить силу резания тем самым уменьшить расход энергии на процесс резания. Можно считать, что этот же инструмент настройки на процесс резания позволит также воздействовать на устойчивость процесса резания и качественные показатели обработанной поверхности.

Список литературы:

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. - Машиностроение, 1975. - 344 с.
2. Петрухин С.С. Общий метод определения кинематических параметров режущей части металлорежущих инструментов / С.С. Петрухин // Известия вузов. Машиностроение. - 1962. - N 10. - С. 151-155.

Надійшла до редакції 24.02.2014

Е.С. Хрістафорян, А.Л. Аршакян, С.Ш. Хрістафорян

РОБОЧІ КУТИ РІЗУЧИХ КЛИНІВ ПРИ РОЗТОЧУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КРУТИЛЬНИХ УЗК І ВІД'ЄМНИМ КУТОМ λ

У роботі розглядаються робочі кути різального клина при розточуванні із застосуванням крутильних УЗК і негативним кутом λ . Показано, що примусові ультразвукові коливання ріжучого клина, а також його розташування по відношенню до осі заготовки і вібрації різної природи значно впливають на продуктивність кутів різання клину. Наведено залежності, що враховують ці зміни.

Ключові слова: кути, ріжучий клин, коливання, режими різання.

E. Khristaforyan, A. Arshakian, S. Khristaforyan

WORKING ANGLES OF CUTTING WEDGES IN BORING USING TORSIONAL USI AND NEGATIVE ANGLE λ

The article discusses working angles of cutting wedges in boring using torsional USI and negative angle λ . It is shown that forced ultrasonic vibrations of the cutting wedge, as well as its location relative to the workpiece axis and vibrations of various nature obviously affect the performance of the cutting wedge. The formulas taking into account these changes are obtained.

Keywords: angles, cutting wedge, vibrations, cutting conditions.