

УДК 621.91.04

*В. А. Данилов, А. Н. Селицкий*

## ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ СТРУЖКИ ПРИ ТОЧЕНИИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ

UDC 621.91.04

*V. A. Danilau, A. N. Sialitskiy*

## ESTIMATION OF CHIP DEFORMATION DURING ROTATIONAL TURNING OF SINUSOIDAL CYLINDRICAL SURFACES WITH A CIRCULAR TOOL FITTED OUT OF CENTER

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки на коэффициент усадки стружки в направлении стружкообразования  $K_c$  и деформацию стружки при ротационном точении некруглых цилиндрических поверхностей с синусоидальным профилем, эксцентрично установленным вращающимся круглым резцом. Степень пластической деформации стружки оценена величиной относительного сдвига  $\varepsilon$  через нормальную  $\varepsilon_n$  и касательную  $\varepsilon_k$  составляющие. Представлены зависимости при обработке трех и четырех выступов некруглого профиля.

### Ключевые слова:

некруглая цилиндрическая поверхность, ротационное точение, параметры срезаемого слоя, усадка стружки, пластическая деформация стружки.

### Abstract

The results of experimental studies are presented which show the effect of processing modes on the chip shrinkage ratio towards chip formation  $K_c$  and chip deformation during rotational turning of sinusoidal cylindrical surfaces with a circular tool fitted out of center. The degree of plastic deformation of the chip is estimated by the magnitude of the relative shear  $\varepsilon$  through the normal  $\varepsilon_n$  and tangential  $\varepsilon_k$  components. The dependences for processing three and four non-round projections are shown.

### Keywords:

sinusoidal cylindrical surface, rotational turning, parameters of the cut layer, chip shrinkage, plastic deformation of chip.

### Введение

Благодаря более высоким эксплуатационным характеристикам при меньшей стоимости изготовления [1] профильные моментопередающие соединения могут эффективно применяться вместо шлицевых и шпоночных соединений в трансмиссиях и узлах различных механизмов и машин. Все чаще встречаются металлорежущие и вспомогательные инструменты с использо-

ванием профильных поверхностей, например, система крепления Coromant Capto фирмы Sandvik Coromant.

В мировой практике чаще применяются моментопередающие соединения с равноосным контуром (РК-профиль), который образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения обрабатываемой заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента, что осуществляется за

счет реверсивных движений либо специальным инструментом с конструктивной подачей.

Применение синусоидального профиля (СК-профиль), близкого по геометрии к РК-профилю, позволяет использовать простую конструкцию инструмента, исключить реверсивные движения, а также производить обработку резанием на универсальных станках (шлицефрезерных) без их модернизации.

При лезвийной обработке металлов срезаемый слой под действием режущего лезвия подвергается пластическому деформированию с образованием стружки. Ее форма и размеры зависят от элементов режимов резания, геометрии режущего лезвия, схемы установки инструмента относительно заготовки и других факторов, влияющих на пластическую деформацию срезаемого слоя. Оценкой степени пластической деформации является изменение геометрических размеров стружки в сравнении с параметрами среза, а также величина полного относительного сдвига.

В [2–6] установлено, что процесс стружкообразования при резании инструментом с обновлением режущей кромки существенно зависит от кинематического коэффициента  $k$ , равного отношению линейных скоростей режущей кромки и заготовки в зоне резания. Особенностью ротационного точения синусоидальных поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом (рис. 1) [7] является то, что оси вращения резца и заготовки взаимно перпендикулярны, а частота вращения резца больше частоты вращения заготовки в отношении, равном числу граней синусоидальной поверхности. Поэтому значение кинематического коэффициента, как показали расчеты, может быть равно 6, а значение кинематического угла наклона режущей кромки  $\lambda_k$  превышать  $70^\circ$ . В [5] представлены результаты исследования деформации стружки при ротационном точении круглых поверхностей с принудительным само-

вращением резца с кинематическим углом наклона режущей кромки  $\lambda_k$  в диапазоне  $0...60^\circ$  и кинематическим коэффициентом до 0,85. В [6]  $\lambda_k$  составляет  $15...45^\circ$  при кинематическом коэффициенте до 1,0 с самовращением инструмента, рабочей частью которого выступает боковая наружная коническая поверхность чашки. В [4] ротационного точения принудительно вращающимся резцом кинематический коэффициент достигает значения 1,6, а угол наклона режущей кромки –  $45^\circ$ .

Таким образом, в известных исследованиях ротационного точения круглых поверхностей кинематический коэффициент существенно меньше по сравнению с обработкой синусоидальных поверхностей, поэтому исследования по оценке степени пластической деформации стружки при ротационном точении синусоидальных поверхностей с различным числом граней в зависимости от кинематического коэффициента и других факторов имеют теоретическое и практическое значение.

### *Методика исследования*

Экспериментальные исследования проводились на шлицефрезерном станке модели HECKERT GFLV-250, так как он обеспечивает достаточную жесткость, не требует модернизации и специальной оснастки для реализации ротационного точения синусоидальных цилиндрических поверхностей. Результаты исследований температуры резца [8] при обработке синусоидальных поверхностей на шлицефрезерном станке свидетельствуют о целесообразном его изготовлении из быстрорежущей стали. Применялись круглые резцы диаметром 50...60 мм из стали Р6М5, которые изготавливались из вышедших из строя угловых фрез. Выбор статических углов заточки инструмента обусловлен изменением рабочих углов [9], поэтому передний угол равен  $10^\circ$ , задний –  $20^\circ$ ; увеличение углов заточки может привести к

потере механической прочности резца. Биение режущего лезвия после заточки 0,01...0,02 мм.

Производилась обработка заготовок из стали 40X, предварительно проточенных до диаметра  $D = 55$  мм со следующими параметрами схемы обработки: число граней  $m = 3$  и 4; эксцентриситет установки резца относительно оси его вращения  $e = 1,5$  мм; радиус резца  $R_p = 30$  мм; частота вращения резца  $n_r = 56, 71$  и  $90$  мин<sup>-1</sup>; максимальная глубина резания  $t = 3,3$  мм; подача  $S_0 = 0,134...0,67$  мм/об.

### **Коэффициент усадки стружки в направлении стружкообразования**

На рис. 1 показаны два положения инструмента, соответствующие двум оборотам заготовки, отстоящих друг от друга в направлении движения подачи на величину  $S_0$ , и  $m$  оборотам вращательного движения ротационного резца. Эти два положения режущей кромки формируют два витка поверхности резания, между которыми в кинематической основной плоскости  $P_{v_k}$  определяется сечение срезаемого слоя толщиной  $a_m$ .

Экспериментально коэффициенты утолщения  $K_a$ , уширения  $K_b$  и укорочения  $K_l$  стружки в зависимости от режима резания при ротационном точении синусоидальных поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом определены в [10]. При стружкообразовании сдвиговые деформации в обрабатываемом материале происходят в плоскости движения стружки по передней поверхности инструмента, при этом направление этой плоскости определяется вектором результирующей (истинной) скорости движения резания. В связи с тем, что при ротационном точении

синусоидальных цилиндрических поверхностей по рассматриваемой схеме резания кинематический коэффициент может быть равным 6, вектор результирующей скорости, а следовательно, и плоскость движения стружки отклоняется на значительно больший угол к режущей кромке, чем при точении самовращающимся резцом. Учитывая указанные особенности ротационной обработки синусоидальных поверхностей, а также наличие признаков косоугольного резания, коэффициенты утолщения  $K_a$ , уширения  $K_b$  и укорочения  $K_l$  не могут в полной мере характеризовать степень пластической деформации [5].

В [6] для оценки степени пластической деформации стружки при ротационном резании предложен коэффициент усадки стружки в направлении стружкообразования  $K_c$ , определяемый как отношение пути резания  $l'$  за время контакта  $t_k$  точки режущей кромки с обрабатываемой деталью к длине траектории этой точки на материале стружки  $l'_c$ :

$$K_c = \frac{l'}{l'_c}. \quad (1)$$

Длина пути резания для инструмента с криволинейной режущей кромкой

$$l' = v'_{em} \cdot t_k, \quad (2)$$

где  $v'_{em}$  – скорость результирующего движения резания (см. рис. 1),

$$v'_{em} = \sqrt{v_{km}^2 + v_{em}^2 - 2v_{km}v_{em} \cos \alpha}; \quad (3)$$

$v_{km}$  – скорость рассматриваемой точки режущей кромки;  $v_{em}$  – скорость без учета вращения резца.

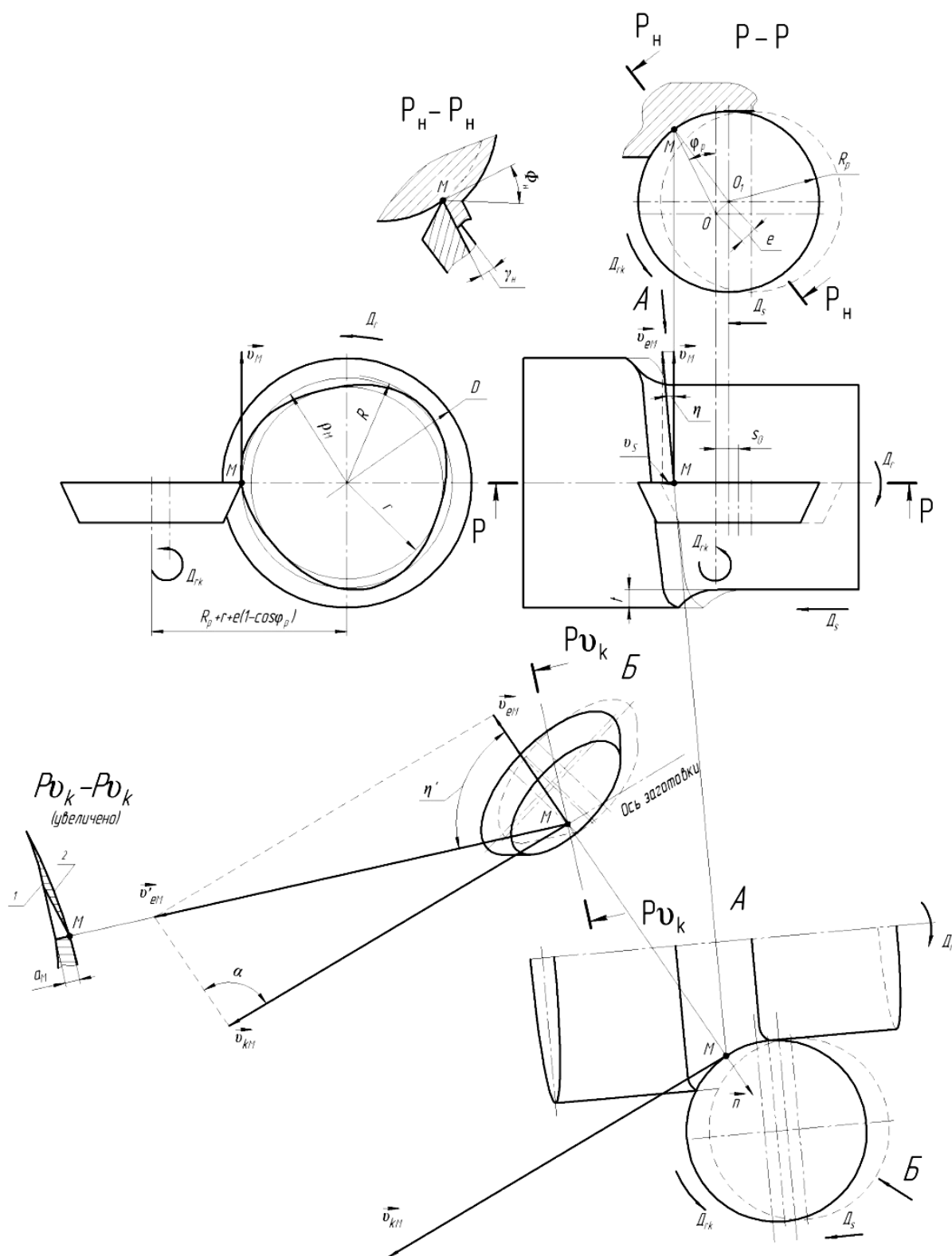


Рис. 1. Схема ротационного точения некруглых цилиндрических поверхностей с синусоидальным профилем эксцентрично установленным круглым резцом

Время контакта  $t_k$  точки режущей кромки с заготовкой определяется по зависимости

$$t_k = b / v_{kM}, \quad (4)$$

где  $b$  – рабочая длина режущей кромки,

$$b = \frac{\pi \cdot \varphi_{p \max} \cdot [R_p + e(1 - \cos \varphi_p)]}{180^\circ}; \quad (5)$$

$\varphi_{p \max}$  – максимальный угол контакта;  
 $R_p$  – радиус круглого резца;  $e$  – эксцентриситет установки круглого резца.

Длина пути стружки в плоскости стружкообразования  $l'_c$  за время контакта рабочего участка лезвия с поверхностью резания определяется рисками на поверхности стружки, которые оставляют после себя точки режущей кромки при вращении резца [6]. Анализируя форму срезанной стружки и расположение рисок на ней можно заключить, что длина пути  $l'_c$  будет равна ширине стружки  $b_1$ , размеры которой определены в [10].

Влияние элементов режима резания на коэффициент усадки стружки в направлении стружкообразования  $K_c$  показано на рис. 2.

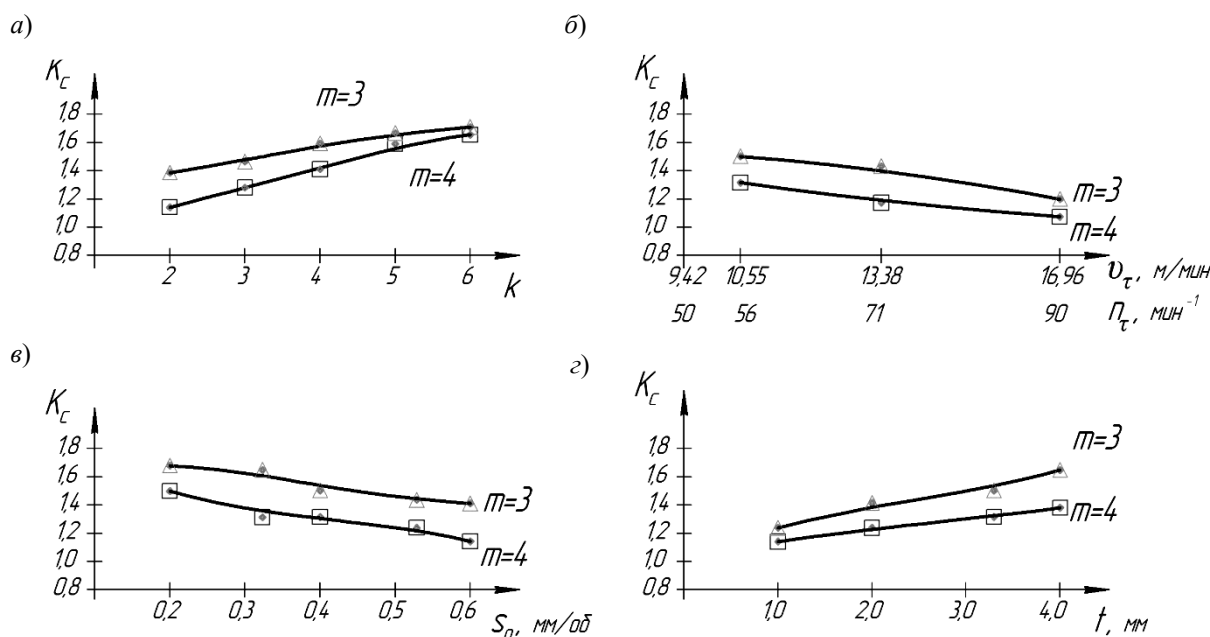


Рис. 2. Зависимость коэффициента усадки стружки  $K_c$  от кинематического коэффициента ( $S_0 = 0,4$  мм/об;  $t = 3,3$  мм) (а), скорости вращения резца ( $t = 3,3$  мм;  $S_0 = 0,4$  мм/об;  $k = 3,25$ ) (б), подачи ( $n_\tau = 56$  мин<sup>-1</sup>;  $t = 3,3$  мм;  $k = 3,25$ ) (в) и глубины резания ( $n_\tau = 56$  мин<sup>-1</sup>;  $S_0 = 0,4$  мм/об,  $k = 3,25$ ) (з)

Из рис. 2, а следует, что с увеличением кинематического коэффициента  $k$  коэффициент  $K_c$  возрастает, что связано с уменьшением длительности контакта инструмента с заготовкой. При увеличении окружной скорости

резца  $v_\tau$  коэффициент  $K_c$  плавно снижается (см. рис. 2, б), что обусловлено запаздыванием пластической деформации срезаемого слоя с увеличением скорости результирующего движения резания. При увеличении подачи (см. рис 2, в)

в 3 раза  $K_c$  уменьшается в 1,2 раза при различных значениях числа граней  $m$ , что связано с уменьшением коэффициента трения стружки по передней поверхности резца [6]. Коэффициент усадки стружки  $K_c$  возрастает с увеличением глубины резания  $t$  (см. рис 2, з).

Коэффициент  $K_c$  во всех случаях имеет большие значения при обработке трехгранных поверхностей. Очевидно это связано с меньшей скоростью обновления режущей кромки и большим временем контакта участка лезвия со срезаемым слоем, что способствует более интенсивному истиранию химических и адсорбированных пленок, облегчающих трение на контактных поверхностях [5, 6].

### Полный относительный сдвиг

В [5] отмечено, что при косоугольном резании коэффициенты  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_l$ , а в [6] и коэффициент  $K_c$  не могут полностью характеризовать деформацию стружки. Степень ее пластической деформации оценивается величиной относительного сдвига  $\varepsilon$  [5, 6], который является объективным показателем объемного деформирования и может быть определен через нормальную  $\varepsilon_n$  и касательную  $\varepsilon_k$  его составляющие:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_n^2 + \varepsilon_k^2}. \quad (6)$$

Нормальный относительный сдвиг определяется выражением [6]

$$\varepsilon_n = \frac{K_n^2 - 2K_n \sin \gamma_n + 1}{K_n \cos \gamma_n}, \quad (7)$$

где  $K_n$  – коэффициент нормального укорочения стружки (величина  $K_n$  эквивалентна  $K_a$ );  $\gamma_n$  – нормальный передний угол (определяется в плоскости,

перпендикулярной к режущей кромке в рассматриваемой точке, и в рассматриваемом случае равен переднему углу).

Касательная составляющая относительного сдвига зависит от коэффициента нормального укорочения стружки [6]:

$$\varepsilon_k = \frac{K_n \operatorname{tg} \lambda_k - \operatorname{tg} \nu}{\cos(\Phi_n - \gamma_n)}, \quad (8)$$

где  $\lambda_k$  – кинематический угол наклона режущей кромки (при нулевом значении угла наклона режущей кромки  $\lambda_k = \operatorname{arctg} m$ );  $\nu$  – угол схода стружки;  $\Phi_n$  – нормальный угол сдвига,

$$\Phi_n = \operatorname{arctg} \frac{1}{K_a \cos \gamma_n - \operatorname{tg} \gamma_n}. \quad (9)$$

Угол схода стружки  $\nu$  определяется из связи между коэффициентами  $K_a$  и  $K_c$ :

$$K_a = K_c \frac{\cos \lambda_k}{\cos \nu}, \quad (10)$$

откуда

$$\nu = \arccos \frac{K_c \cos \lambda_k}{K_a}. \quad (11)$$

Влияние элементов режима резания на полный относительный сдвиг  $\varepsilon$  и его составляющие  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  имеет схожие закономерности при обработке трехгранных (рис. 3) и четырехгранных (рис. 4) синусоидальных поверхностей. Так, с увеличением кинематического коэффициента  $k$  величина  $\varepsilon_n$  уменьшается, а  $\varepsilon_k$  более интенсивно увеличивается, что приводит к росту величины полного относительного сдвига  $\varepsilon$ .

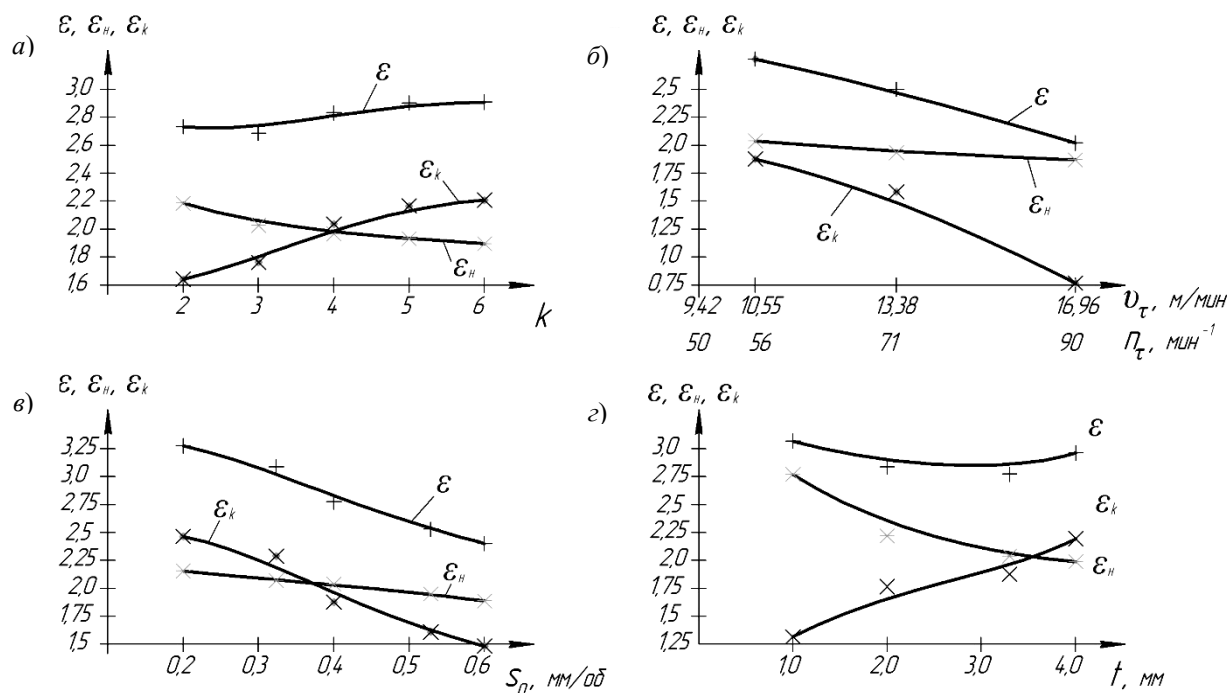


Рис. 3. Зависимость полного относительного сдвига  $\epsilon$  и его составляющих  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_k$  от кинематического коэффициента (а), скорости вращения резца (б), подачи (в) и глубины резания (г) при обработке трехгранных поверхностей

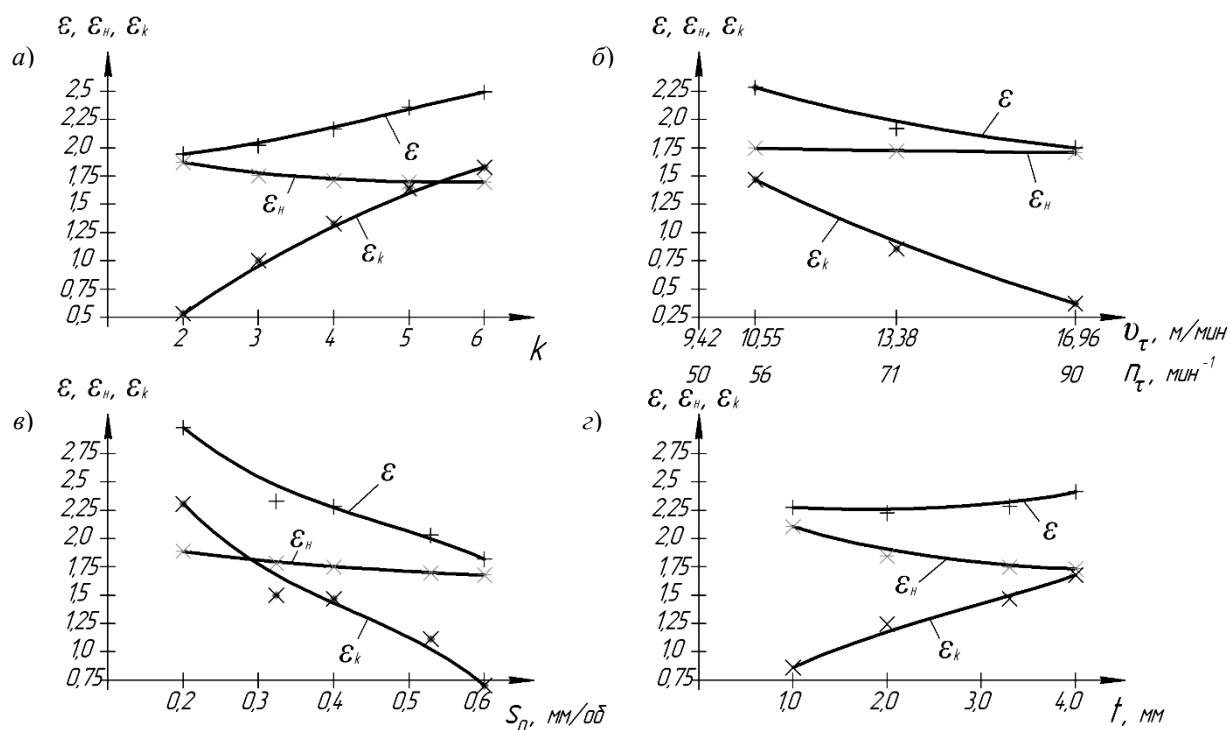


Рис. 4. Зависимость полного относительного сдвига  $\epsilon$  и его составляющих  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_k$  от кинематического коэффициента (а), скорости вращения резца (б), подачи (в) и глубины резания (г) при обработке четырехгранных поверхностей

Это несколько не согласуется с результатами исследований [5], однако соответствует данным [6], что обусловлено иным диапазоном изменения кинематического коэффициента  $k$ : при значениях  $k > 2$  наблюдается увеличение  $\varepsilon$ , т. е. возрастание сдвига слоев стружки вдоль режущей кромки. С увеличением скорости вращения резца  $v_\tau$ , а следовательно, и результирующего движения резания составляющая  $\varepsilon_n$  снижается незначительно по сравнению с  $\varepsilon_k$ , что соответствует исследованиям свободного ротационного точения и связано с температурно-скоростным фактором [6]. С увеличением подачи  $S_0$  значения  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  уменьшаются, что связано с дополнительным воздействием на условия трения и деформацию стружки температурного фактора: увеличение  $S_0$  приводит к росту температуры и уменьшению сдвига. При малых подачах ( $S_0 \leq 0,4$  мм/об при  $m=3$  и  $S_0 \leq 0,3$  мм/об при  $m=4$ ) большее

влияние оказывает касательная составляющая  $\varepsilon_k$ , затем величины  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  вблизи указанных значений выравниваются и далее преобладает нормальная составляющая  $\varepsilon_n$ . Увеличение глубины резания  $t$  влияет на  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  разнонаправлено: нормальная составляющая  $\varepsilon_n$  уменьшается, что является следствием повышения температуры передней поверхности инструмента и снижения коэффициента трения между стружкой и инструментом, а касательная составляющая  $\varepsilon_k$  – увеличивается, вероятно, в связи с увеличением максимального угла контакта  $\varphi_{p \max}$  и времени контакта режущей кромки инструмента с заготовкой.

Влияние элементов режима резания на полный относительный сдвиг  $\varepsilon$  при обработке синусоидальных поверхностей с различным числом граней представлено на рис. 5.

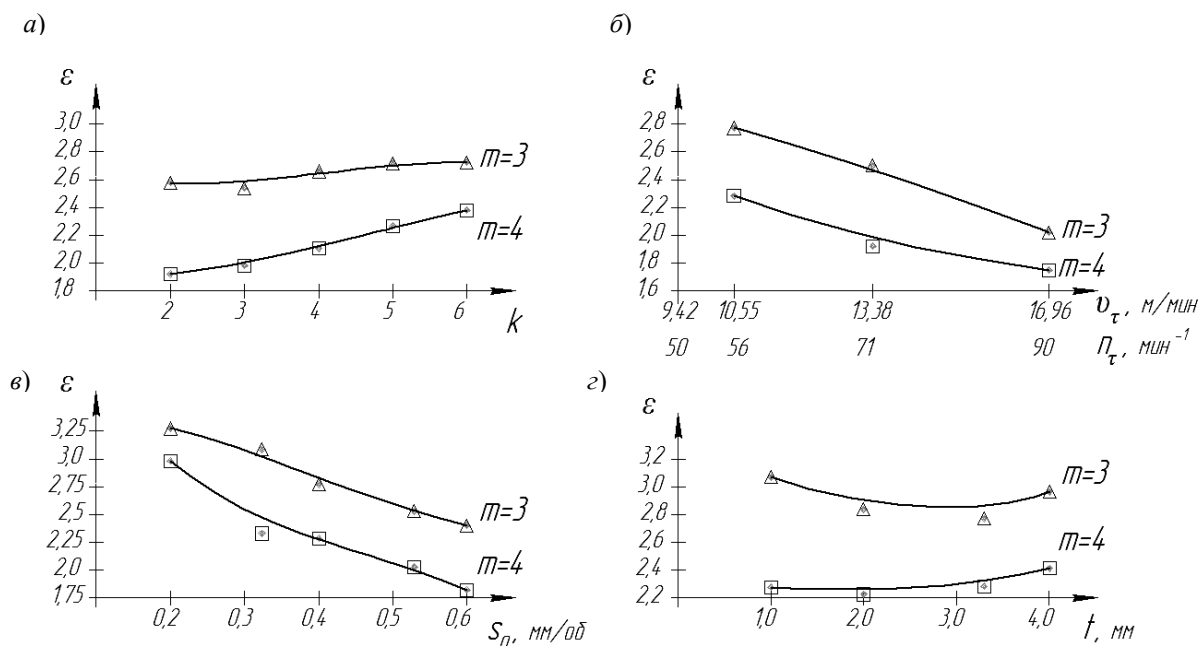


Рис. 5. Зависимость полного относительного сдвига  $\varepsilon$  от кинематического коэффициента (а), скорости вращения резца (б), подачи (в) и глубины резания (з) (условия обработки по рис. 2)



Увеличение количества граней обрабатываемой поверхности приводит к уменьшению относительного сдвига, что объясняется улучшением условий контакта деформируемой стружки с передней поверхностью инструмента [6]. Общее уменьшение величины полного относительного сдвига  $\varepsilon$  сопровождается соответствующим снижением значений его составляющих  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$ , причем большее влияние оказывает касательный сдвиг  $\varepsilon_k$ . Так, при формировании трехгранных поверхностей при изменении элементов режима резания нормальная составляющая  $\varepsilon_n$  изменяется в 1,0–1,4 раза, в то время как касательная  $\varepsilon_k$  – в 1,5–2 раза, а при обработке четырехгранных поверхностей в 1–1,2 и 1,6–3,75 раза соответственно.

### Заключение

Таким образом, на основании результатов экспериментальных исследований деформации стружки при точении синусоидальных поверхностей принудительно вращающимся эксцентрично установленным круглым резцом можно сделать следующие выводы, которые следует учитывать при обосновании параметров схемы обработки и режима резания.

1. Коэффициент усадки стружки в направлении стружкообразования и

полный относительный сдвиг при обработке поверхностей с тремя гранями больше, чем с четырьмя гранями, что связано с большей величиной рабочего угла наклона режущей кромки  $\lambda_p > 70^\circ$  и скоростью ее обновления при  $m = 4$ .

2. Учет в исследованиях коэффициента усадки стружки в направлении стружкообразования  $K_c$  позволяет более точно оценить степень ее пластической деформации при ротационном точении синусоидальных цилиндрических поверхностей: с увеличением кинематического коэффициента и глубины резания коэффициент  $K_c$  возрастает, а при увеличении результирующей скорости резания и подачи  $S_0$  он уменьшается. Наиболее благоприятные условия стружкообразования выявлены при  $k \leq 3,5$ ,  $S_0 \geq 0,4$  мм/об,  $t \geq 1,0$  мм.

3. С увеличением кинематического коэффициента  $k$  и глубины резания  $t$  нормальная составляющая  $\varepsilon_n$  относительного сдвига  $\varepsilon$  уменьшается, а его касательная составляющая  $\varepsilon_k$  возрастает при росте значения полного относительного сдвига  $\varepsilon$ ; с увеличением подачи  $S_0$ , скорости вращения резца  $U_\tau$ , и, следовательно, результирующего движения резания значения  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  уменьшаются.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко, А. И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / А. И. Тимченко; Мосстанкин. – Москва, 1993. – 41 с.
2. Коновалов, Е. Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко, А. В. Соусь. – Минск: Наука и техника, 1972.
3. Ротационное резание материалов / П. И. Ящерицын, А. В. Борисенко, И. Г. Дривотин, В. Я. Лебедев. – Минск: Наука и техника, 1987.
4. Попок, Н. Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Н. Н. Попок. – Минск, 1983. – 286 л.
5. Бобров, В. Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В. Ф. Бобров, Д. Е. Иерусалимский. – Москва: Машиностроитель, 1972. – 112 с.

6. Гик, Л. А. Ротационное резание металлов / Л. А. Гик. – Калининград: Кн. изд-во, 1990. – 254 с.
7. Данилов, В А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 71–82.
8. Данилов, В А. Исследование тепловых явлений при ротационном точении профильных поверхностей с синусоидальным профилем эксцентрично установленным круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 48–51.
9. Данилов, В А. Анализ схемы ротационного точения синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2019. – № 11. – С. 9–14.
10. Данилов, В А. Особенности стружкообразования и экспериментальное определение усадки стружки при ротационном точении синусоидальных поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 71–82.

*Статья сдана в редакцию 06 июля 2020 года*

**Виктор Алексеевич Данилов**, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: +375-17-293-93-58. E-mail: mtools@bntu.by.

**Андрей Николаевич Селицкий**, ст. преподаватель, УО «Полоцкий государственный университет». Тел.: +375-29-593-99-13. E-mail: a.selitskiy@psu.by.

**Viktor Alekseevich Danilau**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Tel.: +375-17-293-93-58. E-mail: mtools@bntu.by.

**Andrey Nikolaevich Sialitskiy**, senior lecturer, Polotsk State University. Tel.: +375-29-593-99-13. E-mail: a.selitskiy@psu.by.