

Оптимальные параметры асимметричных колебаний инструмента для стружкодробления при точении вязких конструкционных сталей

Канд. техн. наук С. С. Данильчик¹⁾, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. На основе анализа различных методов дробления стружки в процессе токарной обработки конструкционных сталей предложен метод точения с асимметричными колебаниями режущего инструмента, позволяющий обеспечить устойчивое дробление сливной стружки и снизить шероховатость обработанных поверхностей. Асимметричные колебания характеризуются коэффициентом асимметрии цикла колебаний, их частотой и амплитудой и дополнительно сообщаются инструменту в процессе точения. Рассмотрена кинематика точения конструкционных сталей с наложением на традиционную схему резания направленных асимметричных колебаний режущего инструмента, создаваемых кулачковой системой. На основе использования рядов Фурье получено уравнение движения инструмента с асимметричными колебаниями. Определено влияние амплитуды и частоты колебательного движения инструмента на процесс дробления сливной стружки. С целью уменьшения негативного влияния амплитуды колебаний на процесс резания и качество обработанных поверхностей обработку следует проводить с минимальной ее величиной. В этом случае необходимо обеспечить оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки. Выведена формула для определения этого отношения в зависимости от коэффициента асимметрии цикла колебаний и числа полных циклов колебаний за один оборот заготовки. Установлено, что теоретическая величина минимальной амплитуды колебаний инструмента равна половине величины подачи инструмента за один оборот заготовки. При несоблюдении оптимального отношения частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки для дробления стружки требуется увеличивать амплитуду колебаний, что может привести к повышению шероховатости обработанных поверхностей.

Ключевые слова: вибрационное резание, стружкодробление, шероховатость, асимметричные колебания, коэффициент асимметрии

Для цитирования: Данильчик, С. С. Оптимальные параметры асимметричных колебаний инструмента для стружкодробления при точении вязких конструкционных сталей / С. С. Данильчик, В. К. Шелег // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 376–382. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-376-382

Optimal Parameters of Asymmetrical Oscillations of Tool for Chip Crushing while Turning Toughened Structural Steel

S. S. Danilchik¹⁾, V. K. Sheleh¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republik of Belarus)

Abstract. A turning method with asymmetric oscillations of cutting tool has been proposed on the basis of the analysis of various methods for chip crushing in the process of structural steel lathe turning and the method makes it possible to ensure a stable crushing of discharge chips and to reduce roughness of the machined surfaces. Asymmetric vibrations are characterized by an asymmetry coefficient of the oscillation cycle, their frequency and amplitude and they are additionally transferred to the tool during the turning process. Kinematics of structural steel turning with imposition of directed asymmetric cutting tool oscillations created by a cam system on traditional cutting scheme has been considered in the paper. An equation of tool motion with asymmetric oscillations has been obtained on the basis of Fourier Series. An influence of the oscillatory tool motion amplitude and frequency on the process of discharge chip crushing has been determined in the paper. In order to reduce a negative influence of the oscillation amplitude on the cutting process and quality of machined surfaces machining must

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleh Valery K.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

be carried out with its minimum value. In this case it is necessary to ensure an optimum ratio of the tool oscillation frequency to the rotational speed of a workpiece. A formula has been derived for determination of this ratio according to a coefficient of oscillation cycle asymmetry and number of complete oscillation cycles per one revolution of the workpiece. It has been established that a theoretical value of the minimum tool oscillation amplitude is equal to half of the tool feed value per one revolution of the workpiece. If the optimum ratio of the tool oscillation frequency to workpiece rotation frequency has not been observed for chip crushing it is necessary to increase oscillation amplitude that may lead to an increase of roughness on machined surfaces.

Keywords: vibration cutting, chip crushing, roughness, asymmetric oscillations, coefficient of asymmetry

For citation: Danilchuk S. S., Sheleh V. K. (2017) Optimal Parameters of Asymmetrical Oscillations of Tool for Chip Crushing while Turning Toughened Structural Steel. *Science and Technique*. 16 (5), 376–382. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-376-382 (in Russian)

Наряду с многочисленными методами и способами дробления сливной стружки при токарной обработке применяется вибрационное точение, кинематика которого широко освещена в научной литературе [1–6]. Основано оно на использовании при точении гармонических колебаний, которые сообщаются инструменту или заготовке. Вибрационное точение эффективно при обработке конструкционных углеродистых и легированных сталей в широком диапазоне режимов резания. Однако оно сопровождается периодическим изменением толщины среза. Максимальное значение толщины среза при вибрационном точении с колебаниями, направленными вдоль осевой подачи инструмента, вдвое больше, чем при обычном точении, что приводит к увеличению шероховатости обработанных поверхностей.

Предложенный авторами метод точения с асимметричными колебаниями инструмента отличается от вибрационного точения различными временными промежутками движения резца в течение цикла колебаний в направлении подачи и обратном направлении [7, 8]. Форма траектории движения инструмента относительно заготовки зависит от коэффициента асимметрии цикла этих колебаний, который можно представить в виде

$$\xi = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где a , b – части оборота заготовки, соответствующие движению инструмента в направлении подачи (врезание) и обратном (отвод) в течение цикла.

Развертки траектории движения инструмента при обработке заготовки диаметром d приведены на рис. 1. Тонкими красными линиями показана траектория движения инструмента при обычном точении с подачей S_0 . Жирные линии синего цвета означают траекторию движения резца при точении с колебаниями. На рис. 1а представлена

траектория движения инструмента с гармоническими колебаниями, коэффициент асимметрии цикла которых $\xi = 1$ ($a = b$). В этом случае точки контакта траекторий движения инструмента, полученных за два последовательных оборота заготовки, располагаются на одной линии, параллельной оси заготовки. При этом максимальная величина расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки $\Delta_{\max} = 2S_0$, что приводит к увеличению высоты гребешков микронеровности и соответственно шероховатости обработанных поверхностей. При точении с асимметричными колебаниями (рис. 1б, в) точки контакта траекторий движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки смещаются друг относительно друга. И чем больше коэффициент асимметрии отличается от единицы, тем больше будет смещение точек контакта. Это позволяет уменьшить максимальное расстояние Δ_{\max} , следовательно, и высоту гребешков микронеровности.

Исследования авторов посвящены определению оптимальных параметров колебательного движения инструмента с асимметричным циклом, обеспечивающего гарантированное дробление стружки, к которым относятся амплитуда и частота колебаний. Для определения таких параметров рассмотрим траекторию движения инструмента в процессе точения. Она получается путем суммирования траектории движения с постоянной подачей и траектории, обусловленной колебаниями. Поэтому путь, пройденный инструментом вдоль оси заготовки, можно представить в виде суммы

$$X = \frac{\omega_3}{2\pi} S_0 + f(x), \quad (2)$$

где ω_3 – угол поворота заготовки; $f(x)$ – дополнительное перемещение резца в результате его колебательных движений.

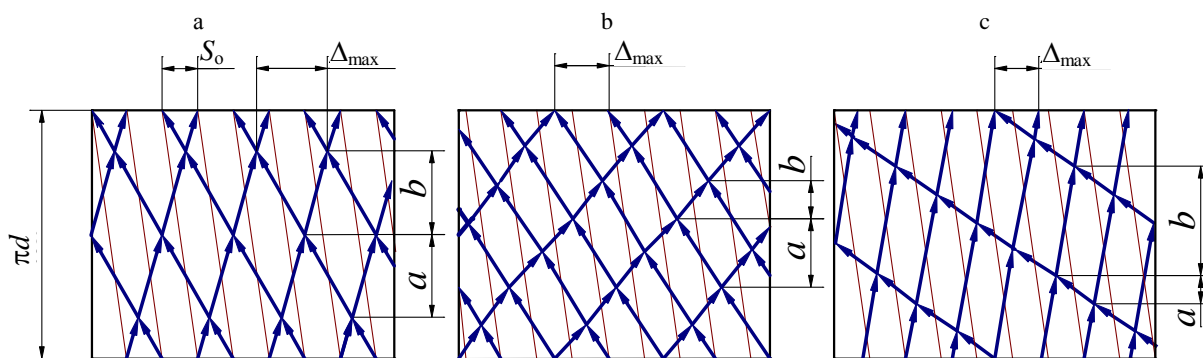


Рис. 1. Развертки траектории движения инструмента при точении с колебаниями инструмента:

a – a = b; b – a > b; c – a < b

Fig. 1. Expansion of tool motion trajectory in case of turning with tool vibrations:

a – a = b; b – a > b; c – a < b

Первое слагаемое суммы в (2) описывает движение с постоянной продольной подачей, а второе – колебательное движение инструмента. В связи с тем, что в асимметричном цикле колебаний инструмента промежутки времени для выполнения периодов врезания и отвода различны, движение инструмента в сторону подачи и обратную сторону задается разными функциями. При этом функции, описывающие траекторию движения как в сторону подачи, так и в обратную сторону, могут быть различными: линейная, синусоидальная, параболическая или другая. Однако с целью упрощения способа реализации этих движений и выполняемых расчетов принимаем линейную траекторию перемещения в цикле колебаний. Эти колебания можно обеспечить кулачком, профиль которого выполнен по спирали Архимеда. Такие колебания с помощью ряда Фурье могут быть записаны одним уравнением, для чего цикл движения инструмента следует рассматривать как периодическую функцию $f(x)$ с периодом 2π (рис. 2), которую можно определить в пределах периода следующим образом:

$$f(x) = -\left(\frac{2\pi A}{x_2} + \frac{2Ax}{x_2}\right) \text{ при } -\pi \leq x \leq -\frac{x_1}{2};$$

$$f(x) = \frac{2Ax}{x_1} \text{ при } -\frac{x_1}{2} \leq x \leq \frac{x_1}{2}; \quad (3)$$

$$f(x) = -\frac{2Ax}{x_2} + \frac{2\pi A}{x_2} \text{ при } \frac{x_1}{2} \leq x \leq \pi,$$

где x_1, x_2 – части периода, приходящиеся на врезание инструмента в заготовку и отвод соответственно, т. е. $x_1 + x_2 = 2\pi$, при этом отношение x_1 к x_2 есть коэффициент асимметрии цикла колебаний ξ .

При преобразовании функции $f(x)$ в ряд Фурье она примет вид [9]

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin kx. \quad (4)$$

Для того чтобы подставить значение функции $f(x)$ в (2), целесообразно значение аргумента x в формуле (4) выразить через угол поворота заготовки ω_3 следующим образом:

$$x = \omega_3 \frac{f}{n},$$

где f – частота колебательных движений инструмента; n – частота вращения заготовки.

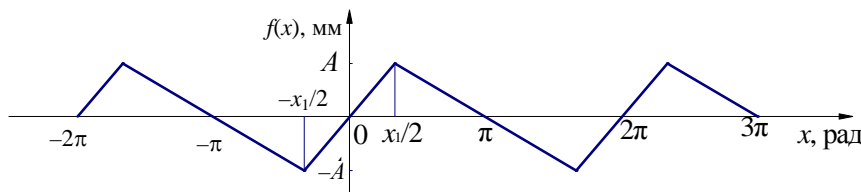


Рис. 2. Периодическая функция колебательного движения инструмента

Fig. 2. Periodic function of tool oscillatory motion

Тогда траекторию движения инструмента относительно заготовки в процессе точения с асимметричными колебаниями можно описать выражением

$$X = \frac{\omega_3}{2\pi} S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin \left(k\omega_3 \frac{f}{n} \right). \quad (5)$$

Если положение инструмента в момент совершения заготовкой ω_3 оборотов определяется выражением (5), то его положение в момент, когда заготовка совершила на один оборот меньше, определится как

$$X' = \frac{\omega_3 - 2\pi}{2\pi} S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \sin \left(k(\omega_3 - 2\pi) \frac{f}{n} \right),$$

а расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ рассчитывается как разность X и X' :

$$\Delta = X - X' = S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \cos \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}. \quad (6)$$

Расстояние Δ периодически изменяет свою величину от минимального до максимального значения и наоборот. Для определения экстремальных значений величины Δ продифференцируем (6) по углу поворота заготовки ω_3

$$\frac{d\Delta}{d\omega_3} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \left(-\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) k \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}.$$

Приравняем производную к нулю и получим

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \left(-\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) k \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\} = 0.$$

Выполнение данного равенства возможно в случаях, когда:

1) $\sin \frac{kx_1}{2} = 0$, что выполняется при $\frac{x_1}{2} = m\pi$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Отсюда следует, что

$x_1 = 2m\pi$, а это противоречит условию $x_1 + x_2 = 2\pi$;

2) $\sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) = 0$, что выполняется при $\pi \frac{f}{n} = m\pi$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Из этого требования следует, что $f/n = m$, т. е. отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки будет равно нулю, что говорит об отсутствии колебаний инструмента, или целому числу. При этом траектории движения инструмента на всех оборотах заготовки параллельны, и дробление стружки происходить не будет, так как образуется стружка постоянной толщины;

3) $\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) = 0$. Из этого случая следует, что

$$(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} = m\pi. \quad (7)$$

Подставив значение (7) в уравнение (6), получим формулу для расчета экстремальных значений расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ в виде

$$\Delta = S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \cos km\pi \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}. \quad (8)$$

Если в (8) второе слагаемое имеет положительное значение, то расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки будет максимальным (Δ_{\max}), если отрицательное – то минимальным (Δ_{\min}). Таким образом, экстремальные значения расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ зависят от подачи S_0 , амплитуды A , величин периодов, приходящихся на врезание инструмента в заготовку x_1 и отвод x_2 , и отношения частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n . Как ранее отмечалось, отношение x_1/x_2 есть ξ . Значит, величина Δ зависит от коэффициента асимметрии.

Влияние разных факторов на экстремальные значения расстояния Δ различно. Из (8), видно, что при увеличении подачи S_0 минимальное Δ_{\min} и максимальное Δ_{\max} значения растут. С увеличением амплитуды колебаний A макси-

мальное значение Δ_{\max} увеличивается, а минимальное Δ_{\min} уменьшается. Изменение экстремальных значений Δ от величин x_1 и x_2 рассмотрим на примере графиков рис. 3, построенных с использованием (8) для исходных данных: $S_0 = 0,4$ мм/об, $A = 0,2$ мм. Значения x_1 и x_2 взаимосвязаны, так как $x_1 + x_2 = 2\pi$. Поэтому на графиках представлена зависимость экстремальных значений Δ от x_1 . Из рис. 3 видно, что зависимости Δ_{\max} и Δ_{\min} от x_1 и x_2 имеют различный характер при разных отношениях f/n . Так, например, для $x_1 = 2$ радианы Δ_{\max} и Δ_{\min} будут иметь меньшие значения при $f/n = 1,6$, чем при $f/n = 1,4$, а при $x_1 = 4$ радианы, наоборот, большие.

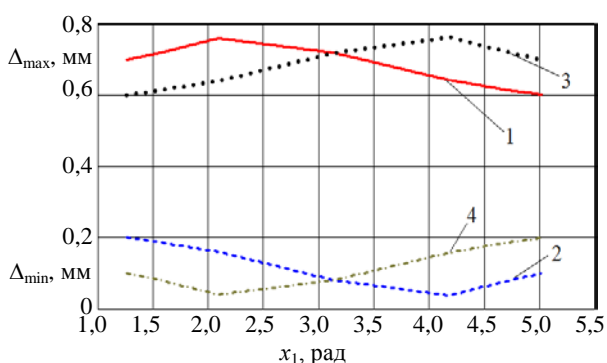


Рис. 3. Зависимости экстремальных значений расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки от x_1 : 1 – Δ_{\max} при $f/n = 1,4$; 2 – Δ_{\min} при $f/n = 1,4$; 3 – Δ_{\max} при $f/n = 1,6$; 4 – Δ_{\min} при $f/n = 1,6$

Fig. 3. Dependencies of extreme distance values between trajectories of tool motion on two consecutive workpiece rotations on x_1 : 1 – Δ_{\max} at $f/n = 1,4$; 2 – Δ_{\min} at $f/n = 1,4$; 3 – Δ_{\max} at $f/n = 1,6$; 4 – Δ_{\min} at $f/n = 1,6$

Это означает, что для определенных значений x_1 и x_2 цикла колебаний, а следовательно, и для соответствующего им коэффициента асимметрии ξ необходимо подбирать оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n . Оптимальным отношением f/n для стружкодробления будет то, при котором минимальное значение расстояния Δ_{\min} между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки будет иметь нулевое значение при минимальной амплитуде колебаний, как показано на рис. 4.

На рис. 4 ломаными линиями 0–5 и 5'–10 показаны траектории движения резца на двух последовательных оборотах заготовки с пода-

чей S_0 и амплитудой колебаний A при обработке поверхности диаметром d . Минимальная амплитуда колебаний обусловлена тем, что касание траекторий происходит по вершинам 1 и 7, 3 и 9 и т. д. При этом инструмент за один оборот заготовки выполняет z полных циклов колебания, а при выполнении $(z + 1)$ -го цикла, переходящего на следующий оборот, траектории движения инструмента соприкасаются (точки 1 и 7). На следующий оборот переходит часть цикла колебаний, равная величине a , на первом же обороте остается часть цикла, равная b . В этом случае можно записать равенство

$$z(a + b) + b = 1. \quad (9)$$

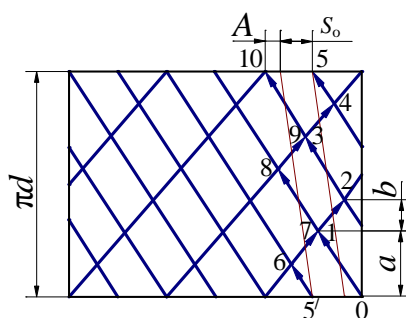


Рис. 4. Развертка траектории движения инструмента при точении с асимметричными колебаниями

Fig. 4. Expansion of tool motion trajectory when turning with asymmetrical oscillations

Таким образом, за один оборот заготовки инструмент совершит z полных циклов колебания и часть цикла, соответствующую периоду отвода инструмента. Из выражения (9) с учетом (1) можно определить необходимые значения a и b цикла колебаний:

$$a = \frac{\xi}{z(\xi + 1) + 1}; \quad b = \frac{1}{z(\xi + 1) + 1}. \quad (10)$$

Для обеспечения необходимых параметров цикла колебаний a и b согласно (10) требуется согласовать частоту колебаний инструмента f с частотой вращения заготовки n , чтобы

$$\frac{f}{n} = \frac{1}{a + b}. \quad (11)$$

Подставив в выражение (11) значения a и b из (10), получим зависимость отношения f/n от коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента в виде

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1}. \quad (12)$$

Например, для точения с коэффициентом асимметрии цикла колебаний инструмента $\xi = 3$ и числом полных циклов за один оборот заготовки $z = 1$ оптимальным отношением частоты колебаний к частоте вращения заготовки f/n по формуле (12) будет 1,25. При другом отношении между элементами стружки образуются перемычки Δ_{\min} , которые затрудняют процесс стружкодробления. Так, на рис. 5 представлена развертка траектории движения инструмента с $f/n = 1,5$. В этом случае для дробления стружки необходимо увеличивать амплитуду A до величины, при которой Δ периодически будет принимать нулевые значения. Однако при этом расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ_{\max} будет увеличиваться, что может привести к повышению шероховатости обработанной поверхности.

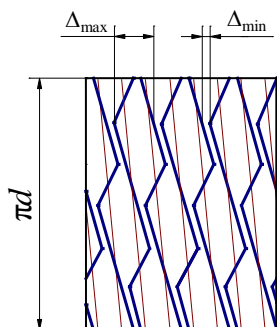


Рис. 5. Развертка траектории движения инструмента при $f/n = 1,5$

Fig. 5. Expansion of tool motion trajectory for $f/n = 1.5$

Для определения необходимой для стружкодробления минимальной амплитуды колебаний инструмента из (8), приравняв Δ к нулю, получим формулу

$$A = - \frac{S_0 x_1 x_2}{16 \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k^2} \sin \frac{kx_1}{2} \cos k\pi \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right)}$$

В этом выражении $\cos k\pi$ может иметь два значения: (+1) и (-1). Амплитуда A может также получаться с положительным и отрицательным знаками, что означает направления колебательного движения инструмента – в сторону подачи или в противоположную сторону. Поэтому для расчета величины амплитуды можно использовать формулу в виде

$$A = \left| \frac{S_0 x_1 x_2}{16 \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k^2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right)} \right|. \quad (13)$$

Расчеты по выражению (13) с учетом значения отношения f/n из (12) показали, что теоретическая минимальная амплитуда колебаний инструмента, обеспечивающая уменьшение Δ_{\min} до нуля, равна

$$A_{\min} = \frac{S_0}{2}.$$

При задании колебаний кулачком коэффициент асимметрии цикла обеспечивается его профилем, выполненным в виде сопряженных ветвей двух спиралей Архимеда: возрастающей с углом θ_a и ниспадающей с углом θ_b , угловое соотношение между которыми устанавливается равным принятому в цикле колебаний отношению периода врезания к периоду отвода резца, причем $\theta_a + \theta_b = 360^\circ$ [10]. Отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n устанавливается частотой вращения кулачка. Величина хода кулачка определяется исходя из величины максимальной амплитуды колебаний инструмента и конструктивных параметров устройства для точения с вибрациями.

ВЫВОДЫ

1. Асимметричные колебания инструмента характеризуются различными временными промежутками движения резца в течение цикла колебаний, т. е. коэффициентом асимметрии цикла. При точении с колебаниями, направленными вдоль подачи инструмента, коэффициент асимметрии можно представить в виде

$$\xi = \frac{a}{b},$$

где a, b – части оборота заготовки, соответствующие движению инструмента в направлении подачи (врезание) и обратном направлении (отвод) в течение цикла.

2. Расстояние между траекториями движения инструмента при точении с асимметричными колебаниями Δ на двух последовательных оборотах заготовки периодически принимает экстремальные значения Δ_{\min} и Δ_{\max} . Для обеспечения гарантированного стружкодробления необходимо установить такую амплитуду колебаний, чтобы минимальное расстояние Δ_{\min} принимало нулевое значение, в результате чего стружка будет перерезаться.

3. При точении с асимметричными колебаниями инструмента необходимо увязать между собой величину коэффициента асимметрии

цикла колебаний и их частоту. Каждому коэффициенту асимметрии цикла колебаний соответствует отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n , обеспечивающее стружкодробление при минимальной амплитуде колебаний инструмента, равной половине подачи на оборот S_0 . Оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки рассчитывается в зависимости от числа полных циклов колебаний инструмента z за один оборот заготовки и коэффициента асимметрии цикла колебаний ξ по формуле

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1}.$$

При несоблюдении этого условия требуется для дробления стружки увеличивать амплитуду колебаний, что может привести к повышению шероховатости обработанных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметшин, Н. И. Вибрационное резание металлов / Н. И. Ахметшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родиков; под ред. К. М. Рагульскаса. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 80 с.
2. Захаров, Ю. Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю. Е. Захаров, В. Т. Гарбузюк. Тула: Приокское кн. изд-во, 1970. 112 с.
3. Подураев, В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
4. Коновалов, Е. Г. Осциллирующее точение / Е. Г. Коновалов, А. В. Борисенко. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 32 с.
5. Мансырев, И. Г. Методы дробления сливной стружки в процессе резания / И. Г. Мансырев, А. А. Смирнов, И. И. Козарь. Л.: ЛДНТП, 1983. 20 с.
6. Богословский, Н. В. Кинематическое дробление стружки при точении труднообрабатываемых сталей / Н. В. Богословский, Т. И. Иващенко // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: материалы краткосроч. науч.-техн. семинара, 13–14 мая / Общество «Знание»; под ред. Ю. М. Зубарева. Л., 1991. С. 47–48.
7. Данильчик, С. С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С. С. Данильчик, В. К. Шелег // Наука и техника. 2013. № 4. С. 16–21.
8. Способ обработки резанием с кинематическим дроблением стружки заготовки из вязкого металла или сплава: пат. 19193 Респ. Беларусь, МПК В 23В 25/02 / В. И. Молочко, С. С. Данильчик; дата публ. 30.06.2015.
9. Молочко, В. И. Математическая модель вибрационного точения с асимметричным циклом колебаний / В. И. Молочко, С. С. Данильчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2007 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. Минск, 2007. Т. 2. С. 250–252.

10. Данильчик, С. С. Расчет конструктивных параметров кулачка для асимметричного вибрационного точения / С. С. Данильчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы четвертой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2006 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. Минск, 2006. Т. 2. С. 177–179.

Поступила 19.04.2017

Подписана в печать 23.06.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Akhmetshin N. I., Gots E. M., Rodikov N. F. Ragulskis K. M. (ed.). (1987). *Vibratory Cutting of Metals*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 80 (in Russian).
2. Zakharov Yu. E., Garbuziuk V. T. (1970) *Useful Vibration in Mechanical Engineering*. Tula, Priokskoe Publishing House. 112 (in Russian).
3. Poduraev V. N. (1970) *Cutting with Vibrations*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 350 (in Russian).
4. Konovalov E. G., Borisenko A. V. (1960) *Oscillating Turning*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of Byelorussian SSR. 32 (in Russian).
5. Mansyrev I. G., Smirnov A. A., Kozar I. I. (1983) *Methods of Crushing Flow Chips During Cutting Process*. Leningrad, Leningrad House of Science and Technology Promotion. 20 (in Russian).
6. Bogoslovsky N. V., Ivashchenko T. I. (1991) Kinematic Chip Breaking while Turning Hard-to-Machine Steel. Zubarev Yu. M. (ed.). *Puti Povysheniya Effektivnosti Obrabotki Materialov Rezaniem v Mashinostroenii: Materialy Kratkosroch. Nauch.-Tekhn. Seminara* [Ways to Improve Efficiency of Material Machining while Using Cutting in Mechanical Engineering. Proceedings of Short-Term Scientific and Technical Workshop, May 13–14]. Leningrad, 47–48 (in Russian).
7. Danilchik S. S., Sheleg V. K. (2013) Turning Kinematics with Imposition of Asymmetric Tool Vibrations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (4), 16–21 (in Russian).
8. Molochko V. I., Danilchik S. S. (2015) *Method of Machining by Cutting with Kinematic Crushing of Chip of Billet from Viscous Metal or Alloy*. Patent Republic of Belarus No 19193 (in Russian).
9. Molochko V. I., Danilchik S. S. (2007) Mathematical Model of Vibratory Turning with Asymmetric Cycle of Oscillations. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Pyatoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of 5th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 250–252 (in Russian).
10. Danilchik S. S. (2006) Calculation of Design Parameters of Cam for Asymmetric Vibratory Turning. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Chetvertoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of 4th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 177–179 (in Russian).

Received: 19.04.2017

Accepted: 23.06.2017

Published online: 29.09.2017