

УДК 621.9

А. Н. Жигалов^{1,2}, доктор технических наук, доцент,**И. А. Горавский**², **Л. Л. Сотник**², кандидат технических наук¹Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

ИНТЕНСИВНОСТЬ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ И СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ КОНЦЕВЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В статье приведены результаты теоретических исследований влияния количества ударов, интенсивности ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом во взаимосвязи с кинематическим движением зуба такого рода фрезерного инструмента. Показано, что условия работы концевой фрезерной головки являются весьма нестабильными, носят явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота инструмента, когда режущий зуб находится или в контакте с обрабатываемым материалом, или вне его, но и в пределах одного реза. Для повышения ресурса данного инструмента необходимо обеспечить улучшение специальных свойств структуры быстрорежущих сталей, идущих на изготовление такого рода инструмента, способных выдерживать нестабильные, прерывистые нагрузки при резании. Установлено, что условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания. Интенсивность ударной нагрузки на зубе концевой фрезерной головки за один рез при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения, в связи с чем наиболее худшими условиями резания, с точки зрения количества ударов и интенсивности ударной нагрузки, являются участки при врезании и выхода из него, что оказывается источником дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом. С помощью математического моделирования установлено, что интенсивность изменения касательной, составляющей силы резания, носит неравномерный характер, отличающийся при разных углах контакта зуба фрезы с заготовкой до 30 раз.

Ключевые слова: концевой фрезерный инструмент; количество ударов; интенсивность ударной нагрузки; силовое воздействие.

Рис. 4. Библиогр.: 12 назв.

A. N. Jigalov^{1,2}, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,**I. A. Goravskii**², **L. L. Sotnik**², PhD in Technical Sciences¹State scientific institution "Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus", 11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru²Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus

INTENSITY OF IMPACT LOAD AND FORCE IMPACT WHEN CUTTING BY THE END-MILLING TOOL

The results of theoretical studies of the number of impacts influence, the intensity of the impact load and the force effect when cutting with an end-milling tool in the conjunction with the kinematic movement of such a milling tool tooth are presented. It is shown that the operating conditions of the end milling tool are very unstable, having a pronounced intermittent character, not only within one revolution of the tool, when the cutting tooth is either in contact with the material being processed, or outside it, but also within one cut. To increase the resource of this tool, it is necessary to improve the special properties of high-speed steels structure used for the manufacture of such tools, capable of withstanding unstable, intermittent cutting loads. It has been established that the cutting conditions, according to the criterion of the number of strokes, by the end-milling tool, significantly, twice, differ during the plunge and the established cutting process, compared with the exit from the cutting process. The intensity of the impact load on the end milling tool tooth for one cut during insertion decreases from the maximum value to a constant value. It is presented during steady

cutting, and then, when the tooth leaves the metal, it increases to the maximum value, and therefore, the worst cutting conditions, with from the intensity of the impact load, there are areas during insertion and exit from it, which are sources of additional instability of cutting process with an axial milling tool. With the help of mathematical modeling, it has been found that the intensity of the change in the tangential component of the cutting force is uneven, differing from each other at different angles of contact of the cutter tooth with workpiece up to 30 times.

Key words: end-milling tool; number of strokes; impact load intensity; force impact.

Fig. 4. Ref.: 12 titles.

Введение. Резание концевым фрезерным инструментом, обеспечивающим обработку путем вращения инструмента без изменения радиуса траектории этого движения и хотя бы с одним движением подачи, направление которого не совпадает с осью вращения лезвийных зубьев, которых должно быть не менее двух, является одним из самых распространенных способов лезвийной обработки металлов. Эффективная работа такого инструмента (концевые, шпоночные и другие фрезы) существенным образом зависит не только от противостояния режущего лезвия инструмента ударным нагрузкам, связанным с врезанием зуба инструмента в обрабатываемый материал и выходом из него, циклическими температурными изменениями на режущем клине во время рабочего и холостого ходов, но и от неравномерности срезаемого слоя материала во время рабочего хода. При этом изменения нагрузки на инструмент, происходящие от неравномерности как толщины, так и ширины срезаемого слоя, образуются от кинематики процесса резания. Лезвийный зуб концевой фрезерного инструмента в процессе резания совершает сложное движение: вращательное вокруг оси инструмента и поступательное вдоль заготовки [1; 2]. Известно, что движение фрезерного инструмента по трохоидальной траектории вызывает затруднения при работе на высокопроизводительных станках с числовым программным управлением [3; 4]. Особенно такое влияние сказывается при высоких частотах вращения шпинделя станка [5; 6]. В исследованиях, в том числе проведенных на основе синергетической концепции, приводятся методологии, позволяющие разрабатывать принципы построения траекторий формообразующих движений зуба фрезерного инструмента [7—9]. Однако существующие разработки не учитывают поведение зуба фрезы в процессе резания в зависимости от параметров инструмента и режимов обработки и не раскрывают закономерности влияния траектории формообразующих движений зуба инструмента от таких параметров на силовые процессы резания.

Авторы определили [10], что толщина a и ширина срезаемого слоя (среза) b от угла поворота фрезы φ при фрезеровании концевым инструментом определяются по зависимостям:

$$a = \sqrt{r_{\phi}^2 + s_z^2 + 2r_{\phi}s_z \sin \varphi} - r_{\phi}, \quad (1)$$

$$b = r_{\phi} \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}, \quad (2)$$

где r_{ϕ} — радиус фрезы;

s_z — подача на зуб;

φ — угол врезания;

ω — угол подъема зуба фрезы на цилиндрической части фрезерного инструмента, имеющей винтовую форму ($\omega = 30 \dots 15^\circ$).

Установлено, что при увеличении радиуса фрезы r_{ϕ} угол врезания φ уменьшается и, соответственно, повышается плавность процесса резания. Наихудшие условия резания с точки зрения прерывистости обработки происходят в пределах от начала врезания зуба фрезы и поворота его до 30° , а также от 150° и до выхода зуба из обрабатываемого материала, причем в указанных диапазонах поворота зуба фрезы изменения радиуса фрезы приводят к незначительному изменению толщины срезаемого, а именно от 5 и до 13 %. В диапазоне от 30° до 150° поворота зуба фрезы изменение радиуса фрезы практически не оказывает влияние на

изменение толщины среза, а также подачи на зуб на изменение толщины среза пропорционально изменению самой подачи на зуб. Также установлено, что при повороте фрезы до угла,

равного $\varphi = ar \cos \left(1 - \frac{t^2}{2r_\phi^2 \operatorname{tg}^2 \omega} \right)$, происходит плавное увеличение ширины среза до заданной

глубины резания t , после поворота фрезы на угол более φ и до угла $180^\circ - \varphi$ ширина среза имеет постоянную величину t , а при угле поворота фрезы на угол более $180^\circ - \varphi$ и до 180° толщина среза плавно уменьшается от величины t до нуля, увеличение радиуса фрезы оказывает пропорциональное влияние на интенсивность изменения толщины среза. Все это обосновывает нестабильность процесса резания концевым фрезерным инструментом.

С учетом полученных результатов исследований [10], указанных выше, стало возможным осуществить проведение теоретических исследований, связанных с определением влияния количества ударов при резании концевым фрезерным инструментом, интенсивности ударной нагрузки и силового воздействия при резании концевым фрезерным инструментом, что происходит от кинематического движения зуба такого рода фрезерного инструмента.

Материалы и методы исследования. Под ударом при резании концевым фрезерным инструментом понимается изменение величины снимаемого припуска от нуля до максимального значения или от максимального значения до нуля. На рисунке 1 представлена схема для определения количества ударов при врезании и устоявшемся резании концевым фрезерным инструментом. Концевой фрезерный инструмент 1 врезается в заготовку 2. Режущий зуб такого инструмента врезается в заготовку в точке 3, а дальнейшее резание осуществляет по дуге 4—5—4.

Как видно из рисунка 1, процесс врезания характеризуется следующим условием:

$$B_0 \leq B \leq 2r_\phi,$$

где B_0 — ширина среза при врезании и выходе зуба фрезы;

B — ширина среза при устоявшемся процессе резания.

Устоявшийся процесс резания происходит при $B = 2r_\phi$.

Угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ зависит от ширины среза B и радиуса фрезы r_ϕ :

$$\sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) = \frac{B}{2r_\phi}.$$

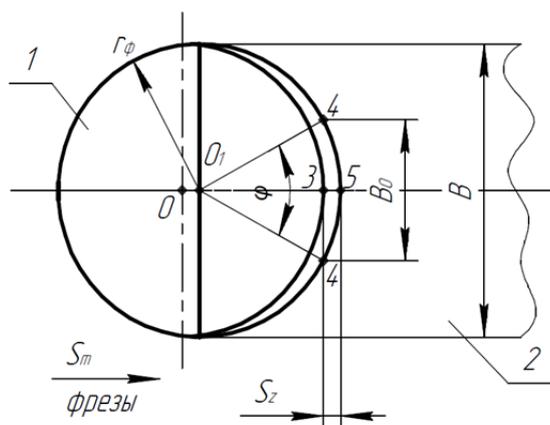


Рисунок 1. — Схема резания концевым фрезерным инструментом

Минимальный угол контакта зуба фрезы φ с заготовкой зависит от радиуса фрезы r_ϕ и подачи на зуб s_z :

$$\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)_{\min} = \frac{r_\phi - s_z}{r_\phi}. \quad (3)$$

Из (3) ширина фрезерования через угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ определится как

$$B = 2r_\phi \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right).$$

Длина резания L_p при фрезеровании концевым фрезерным инструментом равна

$$L_p = L_B + L_y + L_{\text{вых}}, \quad (4)$$

где L_B — длина врезания зуба фрезы в металл;

L_y — длина фрезерования при устоявшемся резании;

$L_{\text{вых}}$ — длина выхода зуба фрезы из процесса резания.

При врезании, происходящем на длине резания $L_B \leq r_\phi$, угол контакта зуба фрезы с заготовкой φ изменяется в диапазоне $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$.

При достижении угла контакта зуба фрезы с заготовкой $\varphi = 180^\circ$, что произойдет на длине резания, равной $L_p = r_\phi$, процесс врезания перейдет в устоявшийся процесс резания, который характеризуется максимальным контактом зуба фрезы с заготовкой, осуществляемый на длине резания $L_y > r_\phi$ и до начала процесса выхода из зоны резания $L_{\text{вых}}$.

Исходя из чего, можно записать:

$$L_p = 2r_\phi + L_y. \quad (5)$$

Тогда с учетом того, что за один оборот фрезы зуб имеет два удара, количество ударов зуба фрезы при врезании равно

$$N_{zB} = 2 \frac{r_\phi}{s_z}. \quad (6)$$

Аналогично определяется количество ударов зуба фрезы при устоявшемся резании:

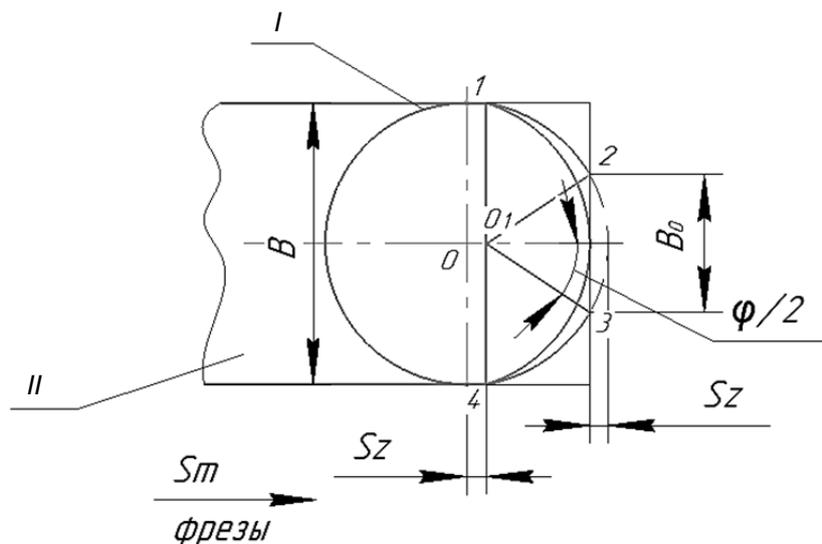
$$N_{zy} = 2 \frac{r_\phi + L_y}{s_z}.$$

На рисунке 2 представлена схема для определения количества ударов при выходе концевого фрезерного инструмента из заготовки.

Как следует из (4) и (5), начало процесса выхода зуба фрезы из зоны резания начинается на длине резания $L_{\text{вых}}$: $L_{\text{вых}} = L_p - r_\phi + L_y$.

При выходе зуба фрезы из процесса резания, что происходит на длине, равной r_ϕ от конца заготовки, во время одного реза зуб фрезы испытывает четыре удара (см. рисунок 2): в точке 1 величина снимаемого припуска начинает изменяться от нуля до максимального значения; в точке 2 — изменяется от максимального значения до нуля; в точке 3 величина снимаемого припуска начинает изменяться от нуля до максимального значения; в точке 4 — величина снимаемого припуска равна нулю. С учетом вышесказанного количество ударов на зубе фрезы при выходе из зоны резания равно

$$N_{zB} = 4 \frac{r_\phi}{s_z}. \quad (7)$$



I — концевой фрезерный инструмент; *II* — обрабатываемая заготовка; 1, 2, 3, 4 — точки контакта зуба инструмента с заготовкой

Рисунок 2. — Схема определения количества ударов при выходе зуба концевой фрезерного инструмента из заготовки

При врезании и устоявшемся процессе резания каждый зуб фрезы за один оборот испытывает по два удара; при выходе зуба фрезы из процесса резания — по четыре удара. Следовательно, условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания, что значительно увеличивает нестабильность такого процесса резания за счет неравномерности действия ударной нагрузки, воздействующей на зуб фрезы. Согласно ГОСТам 17026-71 и 17025-71, концевые фрезы с коническим и цилиндрическим хвостовиками имеют до $n = 8$ режущих зубьев. С одной стороны, увеличение количества зубьев на фрезе уменьшат величину нагрузки на каждом зубе за счет перераспределения площади снимаемого слоя. Но с другой стороны, увеличивается количество ударов на фрезе пропорционально количеству режущих зубьев.

Под интенсивностью ударной нагрузки при резании концевым фрезерным инструментом с количеством режущих зубьев фрезы z будем понимать количество ударов N , совершенных на единице площади срезаемого слоя металла S :

$$N_y = \frac{zN}{S}. \quad (8)$$

Величину площади срезаемого слоя металла S_a можно определить путем интегрирования произведения зависимостей толщины a (1) и ширины b (2) срезаемого среза:

$$S_a = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_{\phi}^2 + s_z^2} + 2r_{\phi}s_z \sin \varphi - r_{\phi} \right) \left(r_{\phi} \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi, \quad (9)$$

где φ_1 — начальный угол контакта фрезы с заготовкой;
 φ_2 — конечный угол контакта фрезы с заготовкой.

Из формулы (9) следует, что площадь срезаемого слоя металла S_a зависит от радиуса фрезы, подачи на зуб, угла подъема зуба фрезы и угла врезания φ .

Для процесса врезания и выхода из процесса резания углы контакта фрезы с заготовкой изменяются от $\varphi_1 = 0^\circ$ (180°) до $\varphi_2 = 180^\circ$ (0°), с учетом чего зависимость (9) примет вид:

$$S_a = \int_0^{180^\circ} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi. \quad (10)$$

Из рисунка 2 видно, что $s_z = r_\phi (1 - \sin \varphi)$.

Для устоявшегося процесса резания угол контакта фрезы с заготовкой равен $\varphi = 180^\circ$. Тогда зависимость (10) примет вид:

$$S_a = \left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin 180^\circ} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos 180^\circ|)} \right).$$

Результаты исследования и их обсуждение. С учетом того, что врезание зуба фрезы в металл и выход его из металла происходят за r_ϕ / s_z резов, и согласно (6)—(8), (10), интенсивность ударной нагрузки будет равна

$$N_y = zkr_\phi / s_z \left[\int_0^{180^\circ} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\left(\sqrt{r_\phi^2 + s_z^2 + 2r_\phi s_z \sin \varphi} - r_\phi \right) \left(r_\phi \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)} \right) \right) d\varphi \right]. \quad (11)$$

где k — количество ударов за один рез (два или четыре).

Количество резов $N_{\text{рез}}$ при фрезеровании заготовки длиной L_p пропорционально значению подачи на зуб s_z и количеству зубьев фрезы z :

$$N_{\text{рез}} = \frac{L_p}{s_z z}.$$

На рисунке 3 представлена интенсивность ударной нагрузки, определенная по зависимости (11), при врезании, устоявшемся резании и выходе из процесса резания на длинах резания для каждого участка, равного радиусу фрезы.

Анализ зависимости (см. рисунок 3) показывает, что интенсивность ударной нагрузки на режущем зубе фрезы, происходящая на единице площади срезаемого слоя металла, при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения. Худшие условия резания с точки зрения интенсивности ударной нагрузки — участки врезания в металл и выхода из него, что является источником дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом.

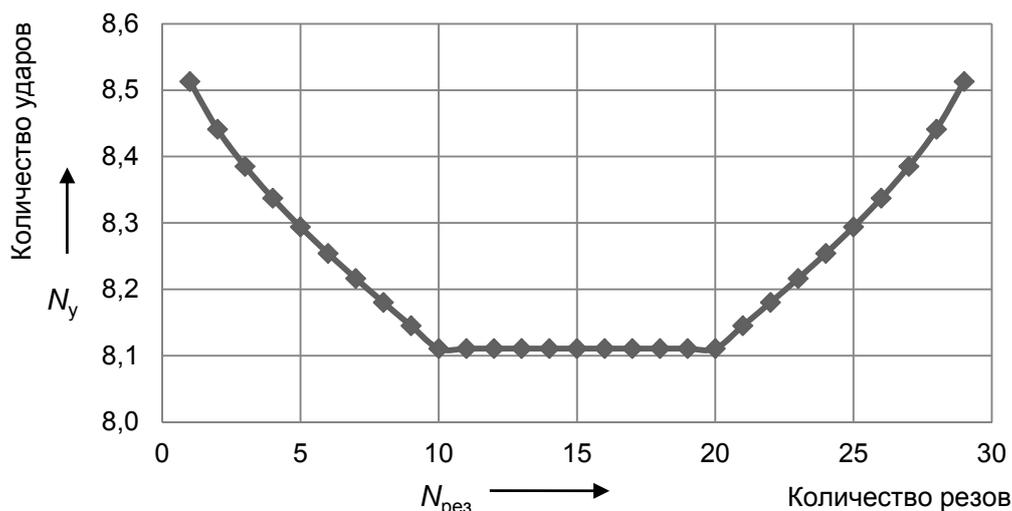


Рисунок 3. — Зависимость интенсивности ударной нагрузки N_y от количества резов $N_{рез}$ при врезании (1...10 резов), устоявшемся резании (10...20 резов) и выходе из процесса резания (20...29 резов) при $r_{\phi} = 6$ мм, $s_z = 0,6$ мм / зуб, $L_p = 18$ мм, $z = 1$ шт.

Силовая модель процесса обработки концевым фрезерным инструментом строится на основе сил резания, действующих в зоне резания [11]. Для производственных целей, как правило, достаточно знать касательную составляющую силу резания P_z , влияющую на мощность оборудования, которая зависит от удельной силы резания q_p (Н / мм²), площади поперечного сечения срезаемого слоя f и определяется по формуле [12]: $P_z = q_p f$.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя f в зависимости от толщины a и ширины b срезаемого среза определяется следующим образом:

$$f = ab. \quad (12)$$

Тогда, подставляя в (12) формулы (1) и (2), получим:

$$P_z = q_p r_{\phi} \left(\sqrt{r_{\phi}^2 + s_z^2 + 2r_{\phi} s_z \sin \varphi} - r_{\phi} \right) \operatorname{tg} \omega \sqrt{2(1 - |\cos \varphi|)}. \quad (13)$$

Удельная сила резания $q_p \approx 1000 \dots 5000$ Н / мм² в зависимости от прочности и твердости обрабатываемого материала. Для стали 45 в состоянии поставки прутков $q_p \approx 1600$ Н / мм² [5].

На рисунке 4 представлена графическая интерпретация зависимости (13) при условиях: $r_{\phi} = 6$ мм, $\omega = 30^\circ$, $t = 2$ мм, угол $\varphi_1 = 33^\circ 36'$.

Из рисунка 4 следует, что изменение касательной составляющей силы резания, совершаемой одним зубом концевой фрезы в единицу времени в зоне резания, в пределах одного реза носит явно неравномерный характер: до угла контакта зуба фрезы с заготовкой, равного углу врезания, происходит увеличение касательной составляющей силы резания по увеличивающейся ветви параболы; после полного врезания инструмента изменение касательной составляющей силы резания происходит по зависимости, близкой к полиному второй степени, причем до 90° — по увеличивающейся ветви, а после 90° — нисходящей, при выходе зуба из процесса резания; при угле, равном 180° за минусом угла врезания, происходит уменьшение силовой нагрузки по нисходящей ветви параболы до нуля.

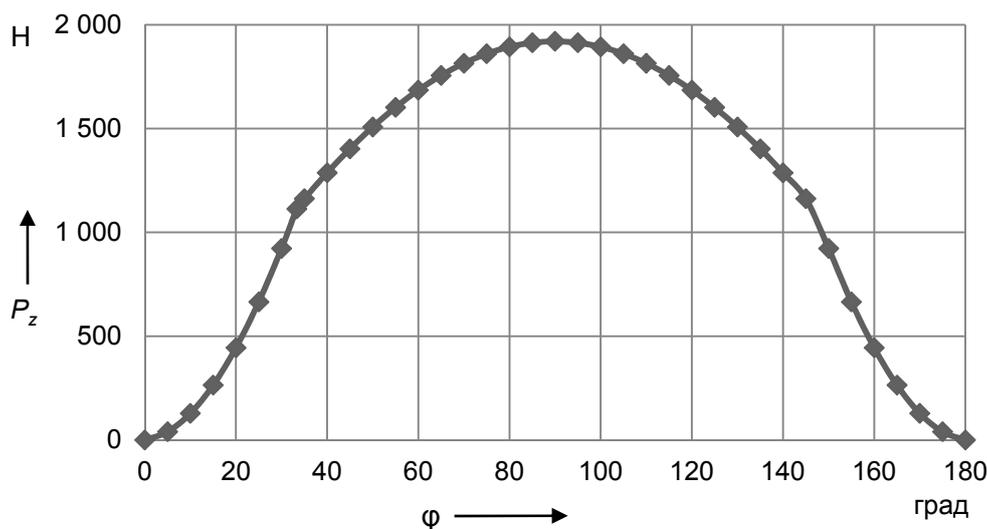


Рисунок 4. — Изменение касательной составляющей силы резания P_z от угла контакта зуба винтовой формы концевого фрезерного инструмента с заготовкой от 0 до 180° ($r_\phi = 6$ мм, $t = 2$ мм, $\omega = 30^\circ$)

Анализ неравномерности изменения касательной составляющей силы резания в пределах резания за один оборот фрезы возможно провести через показатель интенсивности I изменения касательной составляющей силы резания ΔP_z от величины изменения угла контакта зуба фрезы с заготовкой $\Delta\phi$, определяемый по формуле: $I = \Delta P_z / \Delta\phi$.

Из графика (см. рисунок 4) следует, что в пределах резания за один оборот фрезы значения интенсивности существенно отличаются между собой: при ϕ в диапазоне $0 \dots 10^\circ$ интенсивность равна $12,8$ Н / град (касательная составляющая силы резания P_z изменяется от нуля до $128,23$ Н); при изменении угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 10° до $33^\circ 36'$ интенсивность равна $42,1$ Н / град ($\Delta P_{z2} = 1112,8 - 128,2 = 984,6$ Н); при изменении угла контакта зуба фрезы с заготовкой от $33^\circ 36'$ до 90° интенсивность — $1,4$ Н / град ($\Delta P_{z2} = 1920,0 - 1112,79 = 807,4$ Н). Исходя из чего, в диапазоне угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 0° до 90° при увеличении касательной составляющей силы резания P_z интенсивность I изменения касательной составляющей силы резания P_z от величины угла контакта зуба фрезы с заготовкой ϕ может изменяться до 30 раз ($42,1/1,4 = 30$). В диапазоне угла контакта зуба фрезы с заготовкой от 90° до 180° при уменьшении касательной составляющей силы резания P_z изменение интенсивности также может отличаться до 30 раз.

Заключение. Условия работы концевого фрезерного инструмента являются весьма нестабильными, носят явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота, когда режущий зуб инструмента находится в контакте с обрабатываемым материалом и вне его, но и в пределах одного реза. Для повышения ресурса данного инструмента необходимо обеспечить улучшение специальных свойств быстрорежущих сталей, идущих на изготовление их инструментов, которые позволят выдерживать нестабильные, прерывистые нагрузки при резании.

Установлено аналитическим путем, что условия резания по критерию количества ударов концевым фрезерным инструментом существенно, а именно в два раза, разнятся при врезании и устоявшемся процессе резания по сравнению с выходом из процесса резания.

Разработаны математические зависимости, описывающие условия работы концевого фрезерного инструмента, отличающиеся тем, что учитывают кинематические связи между радиусом фрезы, подачей на зуб, углом контакта зуба фрезы с заготовкой и подъемом винто-

вой линии зуба, шириной и длиной фрезерования, количеством ударов при врезании, которые позволяют определить интенсивность ударной нагрузки при врезании и выходе зуба фрезы из процесса резания, а также устоявшемся процессе резания.

Интенсивность ударной нагрузки на режущем зубе концевой фрезерного инструмента, происходящая на единице площади срезаемого слоя металла, при врезании уменьшается от максимальной величины до постоянной, которая присутствует при устоявшемся резании, а затем при выходе зуба из металла увеличивается до максимального значения, в связи с чем создаются худшие условия резания с точки зрения интенсивности ударной нагрузки на участках врезания в металл и выхода из него, что является источниками дополнительной нестабильности процесса резания концевым фрезерным инструментом.

Посредством силового моделирования установлено, что процесс резания концевым фрезерным инструментом является весьма нестабильным и имеет явно выраженный прерывистый характер не только в пределах одного оборота, когда режущий зуб инструмента находится в контакте с обрабатываемым материалом и вне его, но и в пределах одного реза, при этом интенсивность изменения касательной составляющей силы резания носит неравномерный характер, отличающийся при разных углах контакта зуба фрезы с заготовкой до 30 раз.

Список цитированных источников

1. Хвяско, Х. М. Курс теоретической механики : учеб. рук. / Х. М. Хвяско. — Минск : БГТУ, 2000. — 354 с.
2. Чигарев, А. В. Курс теоретической механики : учеб. пособие / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Минск : Новые знания ; М. : ТСУПЛ, 2010. — 398 с.
3. Бжезинский, А. А. Выбор параметров траектории движения фрезы при высокоскоростном фрезеровании / А. А. Бжезинский, Л. А. Колесников // Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. : по материалам Междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении», 6—9 апр. 2010 г. : в 2 т. / Бел. нац. техн. ун-т ; ред. Б. М. Хрусталева. — Минск : БНТУ, 2012. — Вып. 26, т. 1. — С. 17—20.
4. Zakovorotnyi, V. L. Parametric phenomena in processing control in machine-tools / V. L. Zakovorotnyi, A. D. Lukyanov // Applied Sciences and technologies in the United States and Europe : common challenges and scientific findings : 6th International Scientific Conference. — 2014. — P. 113—118.
5. Башаров, Р. Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р. Р. Башаров, Р. Г. Кудояров // Вестн. Уфим. ун-та науки и технологий. — 2012. — Т. 16, № 4 (49). — С. 71—77.
6. Gubanova, A. Investigation of stationary trajectories with associated milling by spur gears [Electronic resource] / A. Gubanova // Dynamic of Technical Systems (DTS-2018) : XIV International Scientific-Technical Conference. — Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822602004>. — Date of access: 05.01.2023.
7. Мартыросов, К. Б. Разработка принципов управления траекториями формообразующих движений на основе синергетической концепции : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / К. Б. Мартыросов. — Ростов н/Д, 2006. — 208 л.
8. Zakovorotny, V. L. Bifurcation Properties of Tribosystems. Control and Self-Organization in Nonlinear Systems / V. L. Zakovorotny // Proc. of First Internet : conference, Balistok. — 2000. — P. 109—126.
9. Zakovorotny, V. L. Synergetic Principle in Dinamic Control in Tribosystems. Control and Self-Organization in Nonlinear Systems / V. L. Zakovorotny // Proc. of First Internet : conference, Balistok. — 2000. — P. 127—144.
10. Кинематическое моделирование процесса резания осевым фрезерным инструментом / А. Н. Жигалов [и др.] // Горная механика и машиностроение. — 2022. — № 4. — С. 29—42.
11. Барботько, А. И. Теория резания. Основы процесса резания : учеб. пособие / А. И. Барботько, А. Г. Зайцев. — Старый Оскол : ТНТ, 2020. — 376 с.
12. Резание материалов и режущий инструмент : метод. пособие / сост.: В. Н. Козлов ; Томск. политех. ун-т. — Томск : ТПУ, 2014. — 131 с.

Поступила в редакцию 24.02.2023.