

УДК 621.941

А.А. Вожжов, ст. преподаватель

Севастопольский национальный технический университет,
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053
0506773532@mail.ru

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С ПИЛООБРАЗНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РЕЗЦА В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Проведен анализ расчетной схемы резания при точении с пилообразными колебаниями инструмента в радиальном направлении, представлена методика аналитического расчета, учитывающая особенности накладываемые параметрами колебаний инструмента.

Ключевые слова: точение с вибрацией, сила резания, колебания инструмента.

В случае виброточения тонкостенных цилиндрических деталей, рассматривается финишная стадия обработки, фактически производится прецизионная лезвийная обработка, формируемый при этом поверхностный слой, в сравнении с абразивными методами, обладает более высокими эксплуатационными свойствами. Это объясняется меньшими силовыми, температурными нагрузками, меньшим градиентом нагрева и охлаждения, а значит - большей однородностью структуры поверхности, отсутствием структурных и химических изменений, образованием более благоприятных остаточных напряжений. Лезвийная обработка не только формирует более закономерный микрорельеф с большой опорной длиной профиля, но и позволяет управлять его параметрами, исключает шаржирование поверхности абразивом.

Для более глубокого изучения данного процесса, математического моделирования процессов обработки, разработки и использования методик диагностики состояния режущего инструмента, остро стоит задача теоретического определения составляющих сил резания, так как использование эмпирических зависимостей при условиях резания, отличных от тех, в которых проводился эксперимент, иногда приводит к значительным ошибкам.

Целью данной работы является создание алгоритма определения сил резания при точении с пилообразными колебаниями инструмента в радиальном направлении, с учетом факторов формирующих величину сил резания в аналитическом виде в любой момент времени.

В общем случае на обычные движения при механической обработке накладываются радиальные колебания в диапазоне ультразвуковых частот. Переменные циклические нагрузки на обрабатываемый материал, обусловлены переменными скоростями и углами резания при виброперемещении инструмента.

При обычном резании без ультразвуковых колебаний (УЗК) величина вектора скорости резания определяется окружной скоростью инструмента или заготовки V . При наложении УЗК вектор скорости резания $\bar{V}_{действ}$ будет являться геометрической суммой двух векторов - постоянного $\bar{V}$ и переменного $\bar{V}(t)$, рисунок 1.

Величина и направление вектора $\bar{V}_{действ}$ определяется как величиной, так и направлением обоих векторов. Поэтому при резании с наложением УЗК на формообразующий инструмент или заготовку скорость резания $\bar{V}_{действ}$ является переменной величиной.

Действительные значения скорости в случае использования пилообразных негармонических УЗК в радиальном направлении могут быть определены с помощью выражения:

$$\bar{V}_{действ} = \begin{cases} \sqrt{V^2 + (a\omega_1)^2}, & \dot{\delta}_1(t) \geq 0; \\ \sqrt{V^2 + (a\omega_2)^2}, & \dot{\delta}_1(t) < 0. \end{cases} \quad (1)$$

где: V – скорость резания; ω – циклическая частота колебаний инструмента ($\omega = 2\pi f$); a – амплитуда колебаний.

При этом при отсутствии колебаний $a = 0$, либо $f_1, f_2 = 0$, значение действительной скорости $\bar{V}_{действ}$ равно окружной скорости V .

Разворот вектора скорости $\bar{V}_{действ}$ приводит к изменению кинематических углов резания (передний, задний угол), как следствие составляющих сил резания при подводе и отводе резца $\gamma_k = \gamma \pm \Delta\gamma$; $\alpha_k = \alpha \pm \Delta\alpha$; где $\Delta\gamma$ и $\Delta\alpha$ - изменение углов при изменении направления плоскости резания.

Изменения углов γ и α оказывает существенное влияние на характер стружкообразования и формирование поверхностного слоя детали. При использовании виброрезания необходима оценка влияния действительных значений $\Delta\gamma$ и $\Delta\alpha$. При резании без колебаний величины $\Delta\gamma$ и $\Delta\alpha$ незначительны.

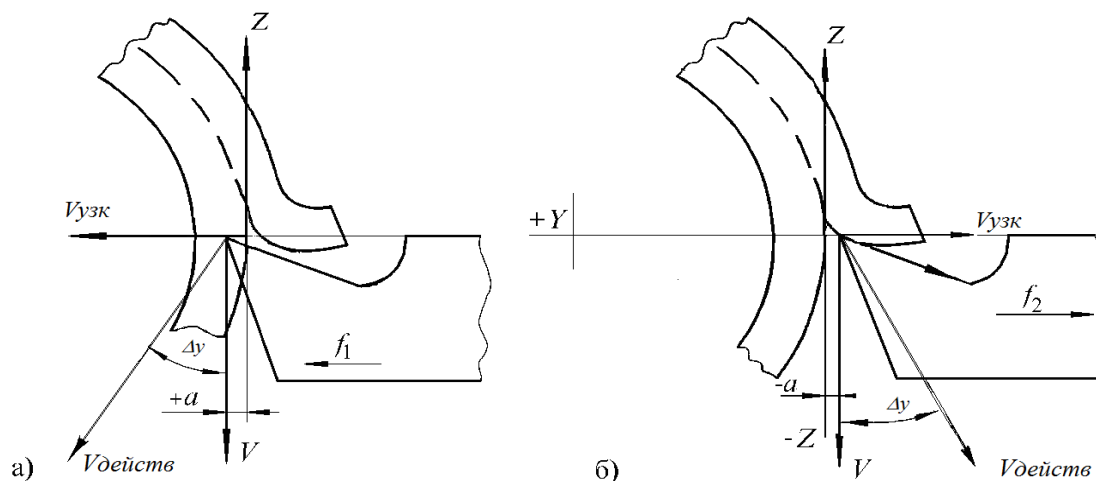


Рисунок 1 – Направление действительной скорости резания при УЗК (а – движение вперед, б – назад)

Схему формирования действительных значений Δy и $\Delta \alpha$ рассмотрим при свободном ортогональном резании при сформировавшейся стружке в некотором мгновенном положении резца. Координатные оси X, Y, Z традиционны. Колебания происходят в координатных осях Y, Z , поэтому рассмотрим именно эту плоскость, по нормали и вдоль поверхности резания, при отсутствии колебаний режущего клина относительно заготовки. Оси Y, Z полагаем неподвижными (рисунок 2).

Координатные оси Y_k и Z_k изменяют свое положение в плоскости в соответствии с колебательным смещением режущего клина относительно обрабатываемой поверхности, при этом положим, что ось Z_k будет совпадать с направлением действительной скорости резания.

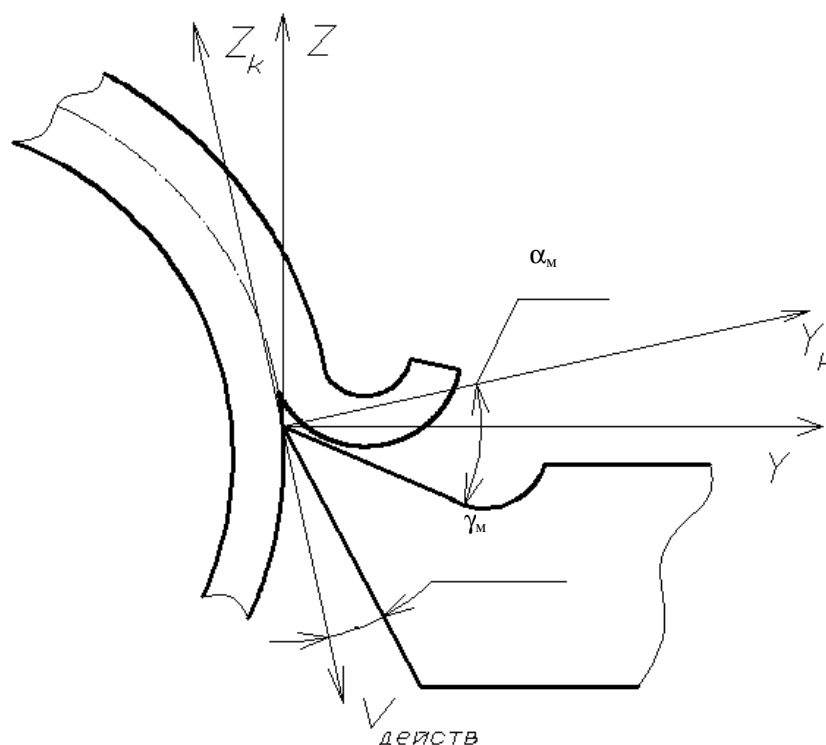


Рисунок 2 – Координатные оси в зоне стружкообразования

Переносное движение резца вызывает изменение схемы процесса резания, плоскость резания приобретает иное положение в пространстве.

Мгновенные значения, например, переднего и заднего угла при этом будут равны:

$$\gamma_m = \gamma_0 - \Delta y, \quad \alpha_m = \alpha_0 + \Delta y, \quad \Delta y = \arctg\left(\frac{V(t)}{V_0}\right) \quad (2)$$

где: γ_0 и α_0 – соответственно передний и задний углы резца; $V(t)$ – мгновенная скорость смещения резца по нормали к поверхности резания относительно обрабатываемой детали; V_0 – скорость резания; Δy – угол поворота координатных осей (Y_k и Z_k) относительно Y и Z .

Угол примем положительным при повороте осей против часовой стрелки то есть при скорости колебания $V(t)$ направленной в сторону обрабатываемой поверхности.

Таким образом, чем меньше скорость резания и чем больше скорость колебательного смещения режущего клина по направлению оси Y тем больше изменяются значения углов, при этом при движении инструмента к детали (вперед) углов γ_m и α_m , причем при внедрении режущего клина в обрабатываемый материал происходит увеличение переднего и уменьшение заднего углов, а при движении из обрабатываемого материала (назад), наоборот.

Изменение характера приложения нагрузки при резании с УЗК в направлении можно рассмотреть на рисунке 3.

При вибрационном резании, когда силы являются импульсными эффект снижения действительных сил резания в контактных парах происходит за счет периодического отрыва поверхности резца от стружки, изменения положения вектора действительной скорости (разворота вектора силы), снижении сил трения при колебаниях.

При подводе происходит отрыв передней поверхности резца от стружки на величину S_1 (рисунок), приводящий к исчезновению нормальной силы N_1 , с которой стружка действует на резец, и силы трения стружки по резцу F_1 ($N_1 = 0$; $F_1 = 0$).

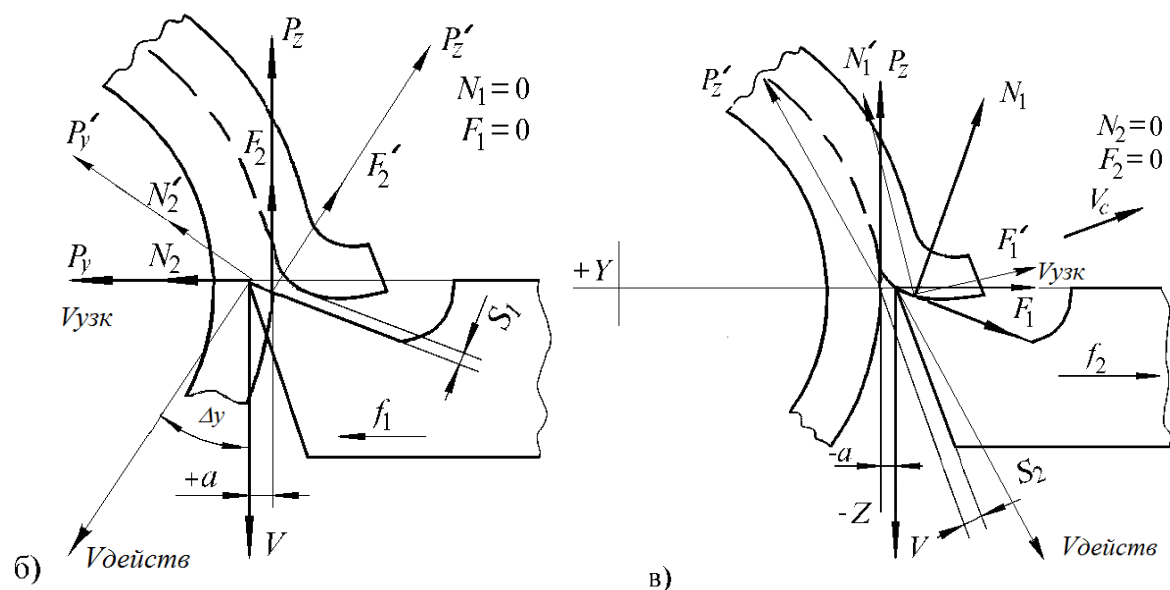


Рисунок 3 – Схема сил действующих при точении с наложением на резец бигармонических колебаний вдоль оси Y

При отводе резца с образованием зазора S_2 исчезают нормальная сила N_2 , действующая на заднюю поверхность, и силы трения детали по задней поверхности F_2 ($N_2 = 0$; $F_2 = 0$) (рисунок 3).

Модель процесса формирования составляющих сил резания строится при следующих допущениях:

Напряженно-деформированное состояние при резании в первом приближении может быть описано как плоское. Режущий клин рассматривается как абсолютно жесткое тело. Тепло выделяемое в процессе пластической деформации и вследствие внутреннего и внешнего трения, рассеивается в пространстве и не изменяет температуру системы. Резание можно условно назвать квазистатическим. Образуется сливная стружка

Рассмотрим силы, действующие на поверхности режущего клина (рисунок 4).

Если известны нормальные и тангенциальные равнодействующие силы на передней и задней поверхностях режущего клина спроецировав их на координатные оси получим выражения для составляющих сил резания P_y и P_z [3]:

$$\begin{aligned} P_y &= -Q_n \sin \gamma_0 + T_n \cos \gamma_0 + Q_3 \cos \alpha_0 + T_3 \sin \alpha_0 \\ P_z &= -Q_n \cos \gamma_0 + T_n \sin \gamma_0 + Q_3 \sin \alpha_0 + T_3 \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Допустим, что в некоторый момент времени в результате наложения на систему резания УЗК режущий клин получил перемещение со скоростью $V(t)$ по координате Y относительно заготовки. Это переносное движение вызовет изменение схемы процесса резания изменятся мгновенные значения переднего и заднего углов, мгновенные значения толщины среза $a(t)$, условного угла сдвига $\vartheta(t)$, коэффициента усадки стружки $K(t)$, величин протяженности контактов по передней и задней поверхностям режущего клина (соответственно $c(t)$ и $d(t)$ и, следовательно, составляющих силы резания, поскольку эти изменения вызывают изменения средних контактных нормальных и касательных давлений, входящих в формулы (3).

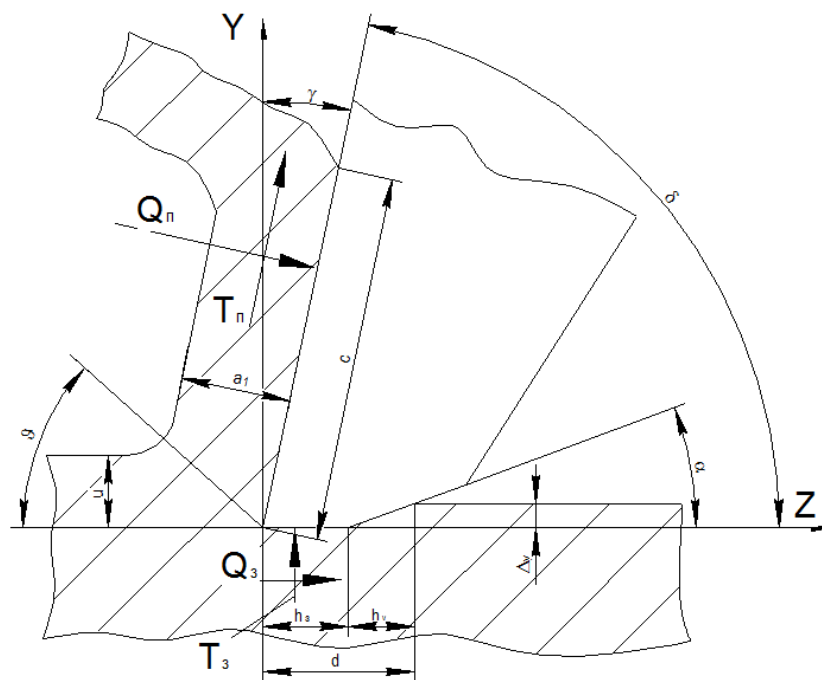


Рисунок 4 – Схема распределения контактных давлений на передней и задней поверхностях режущего клина

Установленные закономерности позволяют дать следующее определение точению с УЗК на финишных операциях: «процесс снятия стружки резцом со своими специфическими закономерностями, определяемыми преобладающим влиянием режимных факторов на геометрические параметры зоны резания». Фактические радиус округления режущего клина, передний угол, фактический главный угол в плане и т. д. в наибольшей степени определяются не параметрами заточки, а величиной подачи, глубины резания и параметрами прикладываемых ультразвуковых колебаний.

Рассмотрим период ультразвукового колебания в одном направлении, условно разобьем его на короткие, равные отрезки времени $\Delta t = t1 - t0 = t2 - t1$, при этом полагаем, что в течение рассматриваемого отрезка времени все параметры зоны стружкообразования неизменны. Переход к следующему промежутку времени происходит скачкообразно.

В условиях колебаний для каждого промежутка времени количество i – элементарных площадок стружки будут различны из-за влияния изменяющейся геометрии резца и других параметров зоны стружкообразования. Число i , контактирующих с передней и задней поверхностями, в различные моменты времени найдем зная длину оснований i стружки. Суммируя произведение числа i и контактных давлений на соответствующую поверхность режущего клина рассчитаем значения составляющих сил резания в данный момент времени.

$$\begin{aligned} P_{zi} &= \sum_1^{k_i} \Delta \mu_i \cdot (-\cos \gamma \cdot \varphi_1(\bar{\mu}_i) + \sin \gamma \cdot \varphi_2(\bar{\mu}_i)) + \sum_1^{l_i} \Delta \eta_m \cdot (\cos \alpha \cdot \varphi_3(\bar{\eta}_m) + \sin \alpha \cdot \varphi_4(\bar{\eta}_m)) \\ P_{yi} &= \sum_1^{k_i} \Delta \mu_i \cdot (-\sin \gamma \cdot \varphi_1(\bar{\mu}_i) + \cos \gamma \cdot \varphi_2(\bar{\mu}_i)) + \sum_1^{l_i} \Delta \eta_m \cdot (\sin \alpha \cdot \varphi_3(\bar{\eta}_m) + \cos \alpha \cdot \varphi_4(\bar{\eta}_m)), \end{aligned}$$

где $\Delta\mu_i, \Delta\eta_m$ – протяженность оснований условных дискретных элементов соответственно на передней и задней поверхностях режущего клина; $\varphi_1(\bar{\mu}_i), \varphi_2(\bar{\mu}_i), \varphi_3(\bar{\eta}_m), \varphi_4(\bar{\eta}_m)$ – функции распределения напряжений на передней и задней поверхностях; γ_0 и α_0 – углы заточки режущего клина; k_i, l_i – число условных дискретных элементов, находящихся в контакте соответственно с передней и задней поверхностями; $\bar{\mu}_i, \bar{\eta}_m$ – координаты средних точек оснований условных дискретных элементов. (Положим оси μ, η выходящими из вершины режущего клина и направленными: μ – вдоль передней поверхности, η – вдоль задней поверхности режущего клина.)

Последовательность вычислений для стабильного процесса стружкообразования с использованием данных основанных на обобщении ряда опубликованных экспериментальных зависимостей можно представить в виде следующего алгоритма:

1. Найдем условный угол сдвига:

$$\Theta_0 = \Theta_y \cdot 9,37 \cdot 10^{-4} \cdot HB^{1,35} \cdot V_0^{0,343} \cdot \sigma_T^{-0,285}$$

где HB – твердость обрабатываемого материала по Бранелю; V – скорость резания в м/мин (для V в пределах 10...320 м/мин); Θ_y – значение условного угла сдвига $\Theta_y = 23,5 + \frac{\gamma_0}{2}$; σ_T – предел текучести материала в МПа.

2. Найдем значение коэффициента усадки стружки:

$$K_0 = \frac{\cos \gamma_0}{\operatorname{tg} \vartheta_0} + \sin \gamma_0$$

3. Найдем протяженность контакта по передней поверхности клина:

$$c_0 = k_c \cdot a_0^{0,45} \cdot \delta_0^{0,97} \cdot V_0^{-0,32}$$

где V – скорость резания в м/мин; a_0 – толщина стружки, $a_0 = s_0 \cdot \sin \varphi_0 \cdot K_0$, s_0 – подача мм/об; δ – угол резания в градусах; ($\delta = 90 - \gamma_0$); k_c – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала (например, для среднеуглеродистых сталей он принимает значение 0,158);

4. Найдем протяженность контакта по задней поверхности клина:

$$d_0 = \rho + h_s + 9,59 \cdot \frac{a_0^{0,523} \cdot \delta_0^{0,73} \cdot V_0^{0,304}}{E \cdot \sin \alpha_0}$$

5. Найдем среднее нормальное контактное давление на передней поверхности:

$$\bar{q}_0 = k_c^{-0,95} \cdot a_0^{0,523} \cdot \delta_0^{0,73} \cdot V_0^{0,304}$$

6. Найдем среднее нормальное контактное давление на задней поверхности:

$$\bar{t}_0 = 0,38 \cdot S_k,$$

где S_k – действительное сопротивление разрыву обрабатываемого материала.

7. Найдем средний коэффициент трения по задней поверхности:

$$m_0 = 0,7 + 0,117 K_0,$$

где K_0 – коэффициент усадки

8. Найдем среднее нормальное контактное давление по задней поверхности:

$$\bar{q}\bar{q}_0 = qq_{max0} \cdot \frac{\pi \cdot (1 - 2 \cdot \mu_0)}{2 \cdot \cos(\pi \cdot \mu_0)} \cdot \left(\frac{d_0 - z_{min}}{z_{min}} \right)^{(\mu_0 - 0,5)}$$

где qq_{max0} – максимальное контактное давление, $qq_{max0} = 3,44 \bar{q}_0$; μ_0 – коэффициент, зависящий от условий трения на поверхности контакта и физических характеристик обрабатываемого материала, $\mu_0 = 0,091 \cdot \operatorname{arctg} m_0$;

9. Найдем среднее тангенциальное давление по задней поверхности:

$$\bar{t}\bar{t} = \bar{q}\bar{q} \cdot m_0$$

10. Найдем составляющие сил резания в соответствии с (3)

$$\begin{aligned} P_{y0} &= \bar{q}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \cos \gamma_0 + \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \sin \gamma_0 + \bar{q}\bar{q}_0 \cdot d_0 \cdot b_0 \cdot \sin \alpha_0 + \bar{t}\bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot d_0 \cdot \cos \alpha_0 \\ P_{z0} &= \bar{q}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \sin \gamma_0 + \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \cos \gamma_0 + \bar{q}\bar{q}_0 \cdot d_0 \cdot b_0 \cdot \cos \alpha_0 + \bar{t}\bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot d_0 \cdot \sin \alpha_0 \end{aligned} \quad (4)$$

где b_0 – ширина среза, мм ($b_0 = \frac{t_0}{\sin \varphi}$).

Алгоритм расчета строится, исходя из следующих исходных положений:

- мгновенные значения переднего и заднего углов, рассчитываем с учетом изменения положения плоскости резания в момент времени $t_0 + \Delta t$, определяем мгновенное значение коэффициента продольной усадки, протяженности контакта стружки и обработанной поверхности с передней и задней поверхностями режущего клина, определяем величины проекций на оси Y и Z равнодействующих нормальных и тангенциальных напряжений на передней и задней поверхности режущего клина;

- считаем условно постоянными функции изменения напряжений на передней и задней поверхностях, в данный момент времени, вне зависимости от параметров зоны стружкообразования. Все параметры зоны стружкообразования, в том - числе и переменные, в рассматриваемом промежутке времени принимаются постоянными.

- максимальные значения нормальных и тангенциальных напряжений вблизи вершины режущего клина определяются мгновенными параметрами зоны стружкообразования.

- в момент времени $t^*_0 + \Delta t$ параметры зоны резания получают те или иные приращения в соответствии с расчетными выражениями. Рассчитывая соответствующие величины через малые отрезки времени (Δt), например через одну тысячную периода колебания при движении вершины резца вперед и аналогичным образом при движении назад, можно оценить динамические характеристики рассматриваемых проекций сил резания в зависимости от изменения параметров колебаний, параметров резания (скорость резания, глубина резания, подача), углов заточки инструмента.

В работе [1], представлен и экспериментально подтвердил импульсный характер резания при синусоидальных колебаниях резца в направлении P_y , импульсный характер резания обеспечивается при выполнении условия при вынужденных колебаниях инструмента в направлении P_y

$$V < 0,00024 a f t g \gamma, \quad (5)$$

где V – скорость резания, м/мин; a – амплитуда колебаний, мкм; f – частота колебаний, Гц; γ – передний угол резца, град.

Если скорость резания оказывается равной или превышает по величине правые части неравенства (5), передняя поверхность резца постоянно контактирует с обрабатываемой деталью и стружкой. При этом механизм, характерный для вибрационного резания, полностью исчезает, и действует механизм обычного резания.

Импульсный характер резания при бигармонических колебаниях резца в направлении P_y , рассмотрен в работе [2], нижний предел частоты обеспечивающий стабильное импульсное вибрационное точение с отрывом передней поверхности резца от стружки ограничен условием, полученным на основании (5):

$$\psi V < 28,8 \cdot \pi \omega a t g \gamma,$$

где $\psi = 1,2 \dots 1,3$ – коэффициент запаса, обеспечивающий стабильное импульсное вибрационное точение с отрывом передней поверхности резца от стружки; ω – циклическая частота колебаний инструмента ($\omega = 2\pi f$).

При соблюдении условия

$$\omega > \psi V / (28,8 \cdot \pi a \cdot t g \gamma)$$

выражения (4) можно представить в виде:

при движении режущего клина вперед с отрывом передней поверхности от стружки

$$P_{y0}(\text{вперед}) = \bar{t} \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot d_0 \cdot \cos \alpha_0 + \bar{q} \bar{q}_0 \cdot d_0 \cdot b_0 \cdot \sin \alpha_0,$$

$$P_{z0}(\text{вперед}) = \bar{t} \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot d_0 \cdot \sin \alpha_0 + \bar{q} \bar{q}_0 \cdot d_0 \cdot b_0 \cdot \cos \alpha_0;$$

при отводе резца с отрывом задней поверхности инструмента от детали

$$P_{y0}(\text{назад}) = \bar{q}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \cos \gamma_0 + \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \sin \gamma_0 ;$$

$$P_{z0}(\text{назад}) = \bar{q}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \sin \gamma_0 + \bar{t}_0 \cdot c_0 \cdot b_0 \cdot \cos \gamma_0 .$$

На основе разработанного алгоритма представлены графики, показывающие зависимость расчетных величин составляющих силы резания при бигармонических колебаниях резца в направлении P_y на интервале одного полного колебания.

Согласно результатам расчетов при следующих исходных данных ($a = 0,01$ мм; $t = 0,1$ мм; $s = 0,02$ мм/об; $V = 18$ м/мин; $\rho = 0,1$ мм; $HB = 170$; $\alpha = 10$ град; $\gamma = 10$ град; $\phi = 45$ град;), кривая – 1 ($f_{\text{вперед}} = 16000$ Гц; $f_{\text{назад}} = 8000$ Гц;) – импульсный характер резания; кривая – 2 ($f_{\text{вперед}} = 4000$ Гц; $f_{\text{назад}} = 2000$ Гц;) – безотрывный характер резания; кривая – 3 ($f_{\text{вперед}} = 0$; $f_{\text{назад}} = 0$;) – резание без вибрации. Сила резания при оттачивании резца от заготовки в первом и втором случае больше, чем при врезании (рисунок 5). Этот же результат получен нами экспериментально. Погрешность расчетов с использованием приведенного метода при сравнении с результатами экспериментов по виброточению стали 45 составила сравнительно небольшую величину (в пределах 17 – 26% в зависимости от параметров резания).

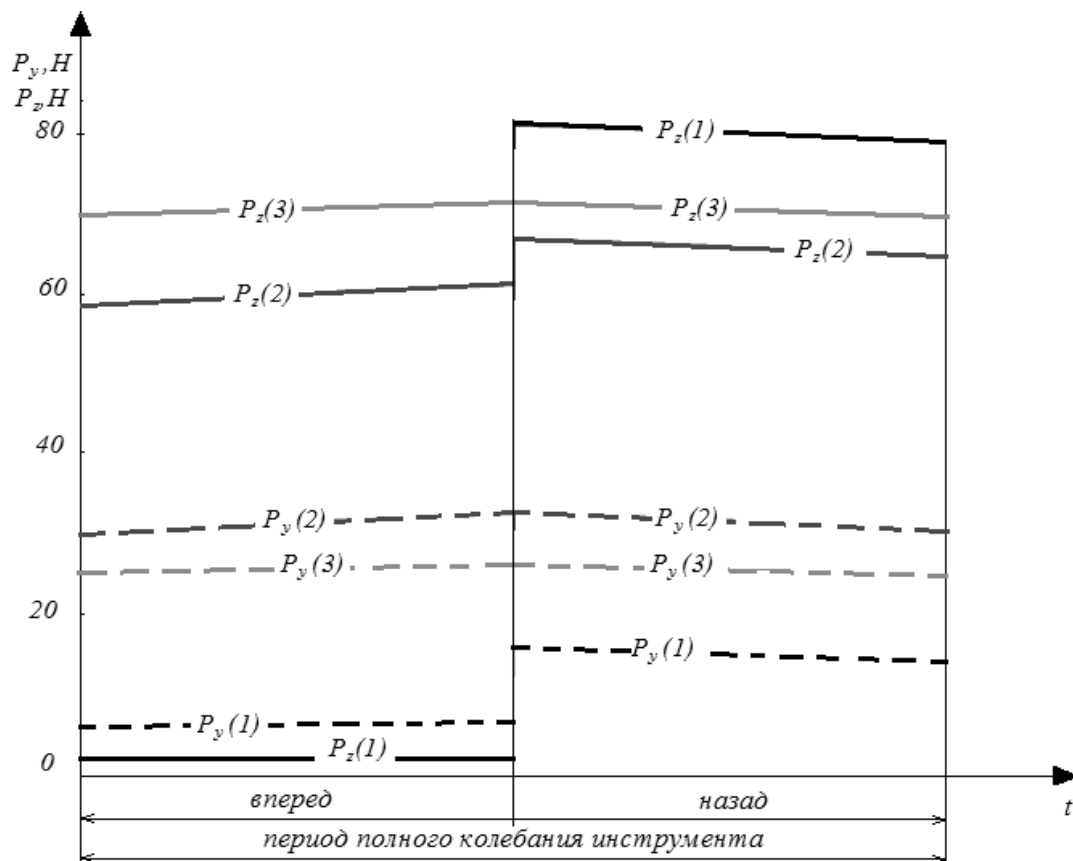


Рисунок 5 – Расчетные величины средних значений составляющих силы резания

Вывод. Представленная методика аналитического расчета, учитывающая особенности накладываемые параметрами колебаний инструмента позволяет получать с достаточной для дальнейших расчетов при моделировании процессов точностью и использовать данный метод для аналитического определения сил резания при виброточении с пилообразными колебаниями инструмента в направлении P_y .

Бibliографический список использованной литературы

1. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленикова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
2. Пашков Е.В. Технологические основы обработки точением тонкостенных цилиндрических деталей: учеб. пособие / Е.В. Пашков. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. — 425 с.
3. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. — М.: Машиностроение, 1969. — 148 с.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

Вожжов А.А. Аналіз особливостей розрахунку сил різання при точінні з пилоподібним коливань різця в радіальному напрямку

Проведено аналіз розрахункової схеми різання при точінні з пилоподібними коливаннями інструмента в радіальному напрямку, представлена методика аналітичного розрахунку, що враховує особливості накладаються параметрами коливань інструмента.

Ключові слова: гостріння з вібрацією, сила різання, коливання інструменту.

Vojjov A.A. Analysis of features of the calculation of cutting forces in turning from a sawtooth cutters in the radial direction

The analysis of the cutting calculation scheme when turning with a sawtooth tool in the radial direction is carried out. The technique of analytical calculation, taking into account the features imposed by the tool motion parameters is offered.

Keywords: turning to vibration, cutting force, vibration tools.