

Ци Мэнсюй (Китай), Шэ Лу (Китай),
Чжан Цинжун (Китай),
Козлов Виктор Николаевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Козлов Виктор Николаевич,
канд. техн. наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ

При исследовании аддитивно-субтрактивной обработки фрезерованием 3D-печатных образцов твёрдосплавными фрезами (ВК8) необходимо исследовать динамику процесса фрезерования через изменение сил фрезерования (P_h , P_v , P_x) (рис. 1), выявить особенности изменения составляющих силы резания, причину резкого или медленного нарастания сил при фрезеровании.

Для выполнения исследований использовался динамометр Kistler [1] (рис. 1). Заготовка закреплялась на столе фрезерного станка с ЧПУ таким образом, чтобы продольная подача была направлена вдоль её наибольшей стороны.



Рис. 1. Положение заготовки относительно фрезы и направление подачи s (s_m , мм/мин) при **встречном** фрезеровании **подложки** концевой фрезой

Для фрезерования образцов после синтеза наплавлением проволокой исследовались процессы при встречном и попутном фрезеровании концевыми фрезами из твёрдого сплава ВК6 четырёхзубыми фрезами диаметром 8 и 12 мм.

В данной статье представлены результаты измерения сил при глубине фрезерования $t = 3,8$ мм, равной чуть меньше половине диа-

метра фрезы (рис. 2 б). Поэтому при врезании зуба на экране монитора появляются составляющая P_h , которая является силой P_z , т.к. при врезании она направлена против направления подачи стола S_M , т.е. пока центральный угол ψ небольшой (рис. 2 а). Составляющая P_v будет представлять силу P_y , т.к. при врезании она направлена радиально и перпендикулярно направлению подачи.

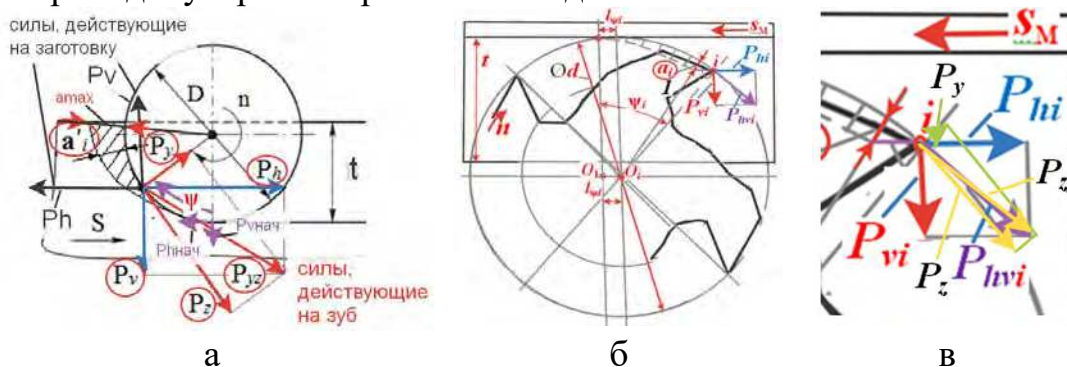


Рис. 2. Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании: а – при положении фрезы **после** заготовки на виде сверху; б – при положении фрезы **перед** заготовкой на виде сверху, как в рассматриваемом эксперименте; в – схема действия составляющих P_{vi} и P_{li} , а также P_z и P_y и их результирующих P_{hvi} и P_{zy}

Т.к. количество зубьев 4 и $t < d_{фп}/2$, то одновременно в контакте с заготовкой будет находиться только один зуб, что облегчает анализ изменения сил при фрезеровании. При выходе зуба из контакта составляющая P_v будет представлять силу P_z , а составляющая P_h будет представлять силу P_y .

Составляющая P_x будет всегда направлена вдоль оси вращения фрезы, поэтому проблемы с изменением направления её действия не будет. Однако по торцу с заготовкой всегда будет контактировать 2 зуба, а иногда, короткое время, даже 3 зуба, т.к. пока один зуб врезается, то предыдущий по торцевой части ещё не вышел из контакта с заготовкой, а следующий уже зашёл в контакт с горизонтальной поверхностью уже обработанной поверхности заготовки. Конечно, сила на следующем зубе небольшая, т.к. он не срезает стружку. Но, тем не менее, сила P_x никогда не будет равна нулю.

Ширина фрезерования b в основном была равна 2 мм, но исследовалась динамика сил и при $b = 8$ мм, чтобы выявить влияние угла наклона винтовой канавки зубьев фрезы, и при $b = 0,5$ мм, чтобы до минимума исключить влияние угла наклона винтовой канавки зубьев фрезы, а выделить силы по торцевой части фрезы.

При частоте вращения фрезы $n = 500$ об/мин время одного оборота фрезы $\tau_{1об} = 1/n = 0,002$ мин = 0,12 с. Время резания одного зуба

четырёхзубой фрезы равно четверти этого времени, т.е. $\tau_{1\text{зуба}} = 0,12/4 = 0,03$ с.

Из рис. 2, б видно, что при использовании острой фрезы для встречного фрезерования, когда зуб врезается в деталь, составляющая сила P_v (сила, перпендикулярная направлению подачи s_m) действует в противоположном направлении от направления оси ОУ, т.е. зуб фрезы при врезании своей главной задней поверхностью и округлённой режущей кромкой **отгалкивает** заготовку от оси вращения фрезы, что не противоречит взаимодействию зуба фрезы с заготовкой в **начальный период врезания**.

При дальнейшем повороте зуба сила P_v действует уже в направлении оси ОУ, т.е. зуб фрезы притягивает заготовку к оси вращения фрезы из-за **положительного** главного переднего угла γ .

Составляющая сила P_h , действующая в противоположном направлении от направления подачи s_m , и являющаяся главной составляющей силы резания, т.к. «отвечает» за срез стружки, непрерывно увеличивается по мере поворота зуба фрезы, что не противоречит взаимодействию зуба фрезы с заготовкой.

Увеличение этой силы происходит из-за увеличения толщины среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi_i$, где s_z – подача на зуб (мм/зуб); ψ_i – центральный угол от точки врезания режущей кромки зуба фрезы в заготовку до текущего положения точки i на главной режущей кромке (рис. 2 б).

По мере поворота зуба фрезы на угол ψ не только увеличивается толщина среза a , но и происходит изменение направления составляющих P_z и P_y силы резания (рис. 2 а, б).

Т.к. в рассматриваемом примере $t = d/2 - 0,2$ мм, то при **врезании** зуба (рис. 3 а, положение 1) составляющая $P_{h\text{врез}}$ соответствует составляющей P_z , а $P_{v\text{врез}}$ соответствует составляющей P_y (рис. 3 а).

При **выходе** зуба из контакта с заготовкой (положение 3) составляющая $P_{h\text{вых}}$ соответствует составляющей P_y , а $P_{v\text{вых}}$ соответствует составляющей P_z (рис. 3 б).

При врезании зуба в заготовку (см. рис. 4, диапазон между числами 1 и 2) зуб фрезы своей округлённой режущей кромкой **отгалкивает** заготовку от оси вращения фрезы, т.е. появляется составляющая сила $P_{v\text{врез}}$ с **отрицательным** знаком, что не противоречит взаимодействию зуба фрезы с заготовкой в **начальный период врезания**.

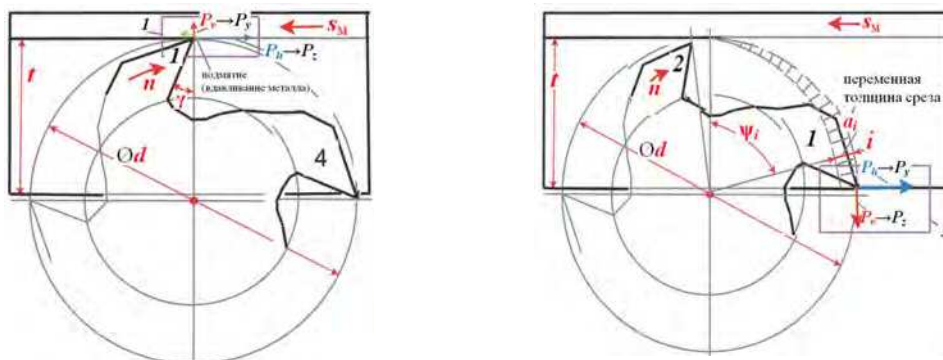


Рис. 3. Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании четырёхзубой фрезой при глубине фрезерования $t = d/2 - 0,2$ мм: а – при врезании зуба № 1 (предыдущий зуб № 4 уже вышел из контакта); б – при выходе зуба № 1 из контакта с заготовкой (следующий зуб № 2 ещё не вошел в контакт с заготовкой).

В это же время (см. рис. 4, диапазон между числами 1 и 2) составляющая сила P_h врез действует с **положительным** знаком, т.е. зуб фрезы толкает заготовку в направлении, противоположном направлению встречной подачи s_m , что не противоречит взаимодействию зуба фрезы с заготовкой в **начальный период врезания**.

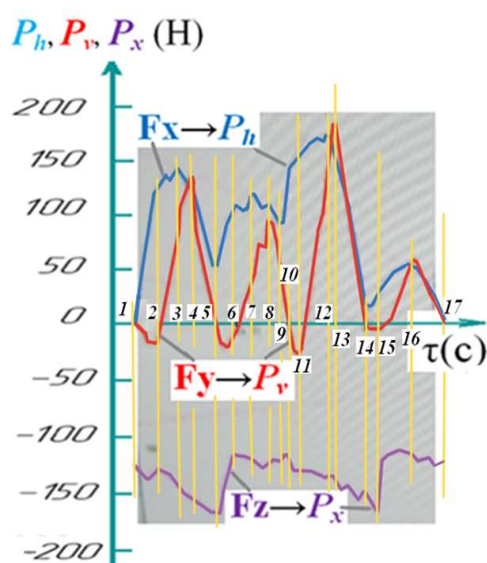


Рис. 4. Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Встречное фрезерование 4-х зубой фрезой $d = \varnothing 8$ мм, $t = 3,8$ мм, $b = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, образец № 1 – твердый сплав.

При дальнейшем повороте зуба (см. рис. 4, диапазон между числами 2 и 3) сила P_v действует уже в направлении оси ОУ, т.е. зуб

фрезы притягивает заготовку к оси вращения фрезы из-за **положительного** главного переднего угла γ .

Составляющая сила P_h , непрерывно увеличивается по мере поворота зуба фрезы (см. рис. 4, диапазон между числами 2 и 3), что не противоречит взаимодействию зуба фрезы с заготовкой.

По мере поворота зуба фрезы на угол ψ не только увеличивается толщина среза a , но и происходит изменение направления составляющих P_z и P_y силы резания (см. рис. 2 а, б, в). При увеличении толщины среза a сила P_z увеличивается более интенсивно, чем сила P_y , т.к. эта составляющая «отвечает» за срез стружки. Сила P_y при увеличении толщины среза практически не должна изменяться при остром режущем клине. Изменение **направления** действия сил P_z и P_y при повороте фрезы на угол ψ (см. рис. 4 в) приводит к тому, что составляющая P_v **увеличивается**, а составляющая P_h **начинает уменьшаться** (см. рис. 4, диапазон между числами 3 и 4).

Дальнейший поворот фрезы приводит к **уменьшению** толщины среза a_i , что вызывает уменьшение составляющих P_z и P_y , а значит и составляющих P_h и P_v (см. рис. 4, диапазон между числами 4 и 5). Уменьшение этих составляющих при этом происходит не так быстро, как уменьшение толщины среза в конце реза зуба, т.к. упругая деформация системы СПИД (станок- приспособление- инструмент- деталь) не позволяет сделать это так резко, как теоретически ожидается. Мы считаем, что с увеличением жёсткости системы СПИД, и прежде всего с увеличением жёсткости концевой фрезы как самого нежёсткого элемента, будем происходить более быстрое уменьшение сил в конце работы зуба фрезы.

Осевая составляющая P_x **изменяется** незначительно в течение всего цикла (см. рис. 4, диапазон между числами 1 и 5), т.к. по торцевой части в контакте с заготовкой находится практически сразу три зуба при четырёхзубой фрезе и глубине фрезерования $t \approx d/2$ (см. рис. 3 а, б). При уменьшении глубины фрезерования $t < 0,2d$, т.е. если глубина фрезерования t будет меньше глубины стружечной канавки фрезы h) в постоянном контакте с заготовкой будет находиться только один зуб. Это вызовет большие изменения величины составляющей P_x при повороте фрезы.

Отрицательная величина знака силы P_x ($P_x = -120 \dots -170$ Н) свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку, что связано с положительным углом наклона зубьев фрезы $\omega = 15-20^\circ$ [1].

Увеличение силы P_x в **отрицательную** сторону в диапазоне цифр 2-5 (см. рис. 4) связано с увеличением толщины среза при повороте фрезы, а уменьшение в диапазоне цифр 5-6 – с уменьшением толщины среза в конце цикла срезания припуска рассматриваемым зубом № 1.

При дальнейшем повороте фрезы следующий зуб фрезы № 2 (см. рис. 3 б) начинает врезаться в заготовку, поэтому цикл изменения составляющих сил повторяется (см. рис. 4, диапазон между числами 5 и 6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
2. Кожевников Д. В., Гречишников В. Л., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. - 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. - 528 с: ил.
3. Козлов В.Н., Петровский Е.Н., Шэ Л., Чжан Х. Особенности фрезерования образцов после аддитивного синтеза // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. – Томск: Томский политехнический университет, 2022 . – [С. 102-104];
4. Козлов В.Н., Ци М., Хань Ц., Мэн С. Анализ нагружения зуба фрезы при обработке стали // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26-28 апреля 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Школа базовой инженерной подготовки . – Томск : Изд-во ТПУ , 2022 . – [С. 628-633];
5. Козлов В.Н., Чжан Ц. Особенность нагружения зуба фрезы при врезании // Современные проблемы машиностроения сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября - 1 ноября 2019 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. Ю. Арляпова [и др.] . – Томск : Изд-во ТПУ , 2019 . – [С. 168-172].