

## **ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ**

**Нечепаев В.Г., Гнитько А.Н.**  
*(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Устойчивой тенденцией современного машиностроительного производства является непрерывное повышение его производительности и качества выпускаемой продукции. Это определяет актуальность поиска путей совершенствования структуры технологических операций, обеспечивающих повышение производительности механической обработки при сохранении качества выпускаемой продукции.

Как известно, одним из обязательных условий повышения производительности обработки резанием является своевременное удаление стружки из рабочей зоны, так как при повторном попадании отделенной стружки в зону резания имеет место увеличение энергозатрат резания, интенсивный износ инструмента и др [1]. Особенно важно своевременно удалять стружку при фрезеровании закрытых профильных пазов (Т-образных, типа "ласточкин хвост"), фигурных лабиринтов и др., поскольку образующееся при этом пространство паза в силу его замкнутости весьма быстро заполняется отделенной стружкой, а затем в процессе циркуляции происходит ее повторное резание.

Наибольшее применение обработка закрытых профильных пазов находит в станкостроительной промышленности.

Обработка Т-образных пазов и пазов типа «ласточкин хвост» занимает более половины трудоемкости обработки столов обрабатывающих центров, фрезерных, сверлильных, плоскошлифовальных и других станков.

Закрытые профильные пазы, прямоугольные пазы, карманы и другие глубокие пазы, являясь весьма нетехнологичными элементами конструкций, в тоже время составляют существенную часть общего объема металлообработки. По выполненной нами оценке объем такой обработки составляет в Украине – около 4,5 км в год, в России – около 15 км, в мире – около 900 км.

Из приведенного следует вывод о весьма широком применении закрытых профильных пазов, что определяет актуальность поиска путей повышения производительности их обработки. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие конкретные задачи.

1). Выполнить анализ существующих технических решений устройств удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов, теоретических основ их функционирования и методик определения параметров.

2). Разработать новые технические решения, обеспечивающие повышение производительности фрезерования закрытых профильных пазов.

3). Разработать частные и интегральные математические модели функционирования основных подсистем и модулей устройств удаления стружки.

4). Провести экспериментальные исследования для подтверждения адекватности разработанных теоретических положений и определения эффективности разработанных технических решений.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Анализ накопления и удаления стружки.

Исследованиям в этой области посвящены работы многих ученых и научных учреждений. В них рассматриваются устройства для удаления отделенной стружки на операциях точения, сверления и торцевого фрезерования.

Применительно же к фрезерованию закрытых профильных пазов конструктивные схемы, теоретические основы и методики определения параметров устройств удаления стружки из зоны резания не установлены. При этом П.Р. Родин, И. И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров и др. указывают на то, что применяемые для фрезерования закрытых профильных пазов Т-образные фрезы работают в тяжелых условиях и часто ломаются. Причинами этого, по мнению указанных авторов, являются «загромождение зоны обработки стружкой, затрудненный ее отвод и др.» [2, 3].

В то же время, применительно к другим видам обработки средства принудительного удаления стружки из зоны резания известны и применяются достаточно широко. Так, при глубоком сверлении применяется принудительное удаление стружки из рабочей зоны при помощи напорной подачи смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону резания по осевому каналу в теле сверла. Известны конструкции протяжек, метчиков и резцов с внутренними каналами для подачи СОТС с целью охлаждения инструмента и удаления стружки из рабочей зоны. Применяется также подача СОТС через поры в теле шлифовального круга для очистки инструмента и охлаждения зоны резания и др. Однако, типовые решения и подходы к определению рациональных параметров таких устройств не могут быть использованы при фрезеровании закрытых профильных пазов из-за существенных различий физической картины рабочего процесса и потребных параметров устройств удаления стружки. Основные отличия относятся к следующим моментам:

- типу образующейся стружки и особенностям ее формы;
- схемам накопления и перемещения стружки после ее отделения;
- конфигурации и объему рабочего пространства режущего инструмента;
- траектории перемещения стружки;
- значению скорости ее перемещения и накопления;
- режимам обработки и силам резания и т.д.

Отсюда следует, что существует значительная практическая потребность в разработке специальных эффективных устройств принудительного удаления стружки применительно к фрезерованию закрытых профильных пазов.

Для создания таких устройств рассмотрен процесс накопления стружки при обработке Т-образных профильных пазов.

В этом процессе можно выделить два характерных этапа.

**Этап 1** – заполнение стружкой пространства между зубьями фрезы.

А) Перемещение элемента стружки вдоль передней поверхности зуба фрезы.

Непосредственно после отделения элемент стружки (рис. 1) имеет скорость  $V_{стр}$ , вектор которой направлен от периферии к центру фрезы (положение зуба 1). Поэтому, после отделения элемент стружки перемещается к стружечной канавке, расположенной у ножки зуба (положение зуба 2). Далее, в зависимости от соотношения действующих в системе сил, стружка перемещается либо от периферии к центру фрезы, либо в противоположном направлении – от ее центра к периферии (положение зуба 3, 4). Как установлено в результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований [4], в большинстве случаев (для рекомендованных стандартом [5] режимных и конструктивных параметров), элемент стружки перемещается от периферии к

Рис. 1. Перемещение элемента стружки в пространстве между зубьями фрезы после его отделения

центру фрезы, т.е. в направлении, противоположном, необходимому для его удаления. Это приводит к дальнейшему накоплению элементов стружки в стружечной канавке (положение зуба 6, 7) и их повторному резанию (положение зуба 5, 8).

Таким образом, очевидно, что существующие методы удаления стружки (ручные устройства; пневмопистолет; при помощи СОТС, подаваемой через сопла, расположенные вне режущего инструмента) не решают проблемы своевременного удаления стружки из пространства между зубьями фрезы, так как не оказывают воздействие непосредственно на элементы стружки, находящиеся в указанной зоне.

#### Б) Накопление стружки в пространстве между зубьями фрезы.

При дальнейшем накоплении элементов стружки в пространстве между зубьями фрезы, происходит ее циркуляция (наблюдавшаяся при проведении экспериментальных исследований) и повторное резание [4], что приводит к увеличению сил резания, повышенному износу режущих кромок зубьев и ухудшению качества обрабатываемых поверхностей. Это обуславливает необходимость снижения режимов обработки, а значит и ограничение производительности.

#### **Этап 2** – заполнение стружкой обрабатываемых пазов.

Следует подчеркнуть, что перемещение элементов стружки от центра к периферии фрезы только под действием инерционных сил не обеспечивает решение задачи устранения ограничения производительности фрезерования. Объясняется это тем, что в этом случае их перемещение осуществляется на очень малые расстояния (в пределах

10-20 мм) и сопровождается дальнейшим накоплением в прямоугольном пазу (полученном при предварительной обработке Т-образного паза) и в обрабатываемом Т-образном (рис. 2). Так как плотность стружки значительно меньше плотности обрабатываемого материала, то стружка быстро заполняет пространство пазов и оказывает подпор режущему инструменту. Вследствие этого исключается ее «самоудаление» из пространства между зубьями фрезы за счет действующих инерционных сил. Это приводит к повторному попаданию стружки в зону обработки, ее повторному резанию, а в результате – к ограничению производительности фрезерования.

а)

б)

Рис. 2. Расчетные схемы заполнения стружкой пазов при фрезеровании:

- а) формирование тела волочения спереди от фрезы;
- б) формирование тела волочения сзади от фрезы

Проведенный анализ позволил установить, что для большинства рекомендованных стандартом [5] режимов обработки без принудительного удаления стружки имеет место ограничение производительности фрезерования закрытых профильных пазов.

#### **Разработка технических решений.**

В качестве принципиальной основы для создания устройств принудительного удаления стружки предлагается подача напорных струй воздушно-жидкостной рабочей среды в зону обработки закрытых профильных пазов.

Выполненный нами анализ позволил предложить 3 основные схемы принудительного удаления стружки.

1. За счет принудительного удаления стружки из пространства между зубьями

фрезы (подача СОТС по каналам в теле инструмента). Исследования, направленные на создания теоретических основ функционирования и конструкций таких устройств применительно к фрезерованию закрытых профильных пазов, не установлены.

2. За счет принудительного удаления стружки из пространства вне режущего инструмента (подача СОТС по каналам внешнего сопла). Исследования, направленные на создание теоретических основ функционирования таких устройств и методики определения их рациональных параметров применительно к фрезерованию закрытых профильных пазов, также не установлены.

3. Комбинация 2-х предыдущих способов.

Для реализации первой схемы принудительного удаления стружки разработан ряд технических решений, имеющих патентную защиту, например [6]. Основная идея данного решения заключается в подаче жидкости по каналам в теле инструмента с целью своевременного удаления стружки из пространства между зубьями фрезы и охлаждения зоны резания.

Применительно к существующим и разработанным техническим решениям выполнено системное представление объекта исследования (системы удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов), в результате чего выделены 2 подсистемы и 5 модулей, а также установлены их взаимосвязи [7]. Для описания функционирования как отдельных подсистем и модулей, так и системы удаления стружки в целом, установлено необходимое (5) количество математических моделей, а также их взаимосвязи.

#### **Теоретические исследования.**

1. Для исследования заполнения стружкой пространства между зубьями фрезы в процессе резания разработана математическая модель ММ1, позволяющая определить количество оборотов фрезы  $N$ , соответствующее полному заполнению пространства между зубьями.

$$N = f_1(h_1, \beta_z, l, \omega_n, S_z, d, a, \omega_o),$$

где  $N$  – количество оборотов фрезы;  $S_z$  – подача на зуб фрезы;  $d$  – диаметр фрезы;  $a$  – ширина предварительно обработанного паза;  $l$  – высота режущей части фрезы;  $\omega_o$  – объемный коэффициент;  $h_1$  – длина передней поверхности зуба фрезы;  $\beta_z$  – угол между передней поверхностью зуба фрезы и поверхностью затылка следующего зуба;  $\omega_n$  – угол подъема винтовой канавки фрезы.

Выполненный анализ позволил установить, что заполнение пространства между зубьями фрезы происходит достаточно быстро, в среднем за 2-5 оборотов.

2. Для исследования перемещения элемента стружки вдоль передней поверхности зуба фрезы под действием инерционных сил и гидродинамической силы принудительного воздействия разработана математическая модель ММ2 [4], позволяющая определять мгновенное значение скорости  $v_1$  перемещения элемента стружки в результате инерционного и (или) принудительного воздействия на него в пределах инструмента (фрезы).

$$v_1 = f_2(\omega, f_n, \alpha, \delta, F_{np}, \rho, \beta, g, f_n, r_{fp}, \dots),$$

где  $t$  – время перемещения элемента стружки вдоль передней поверхности зуба фрезы;  $\omega$  – угловая скорость элемента стружки в переносном вращательном движении;  $f_n$  – коэффициент трения элемента стружки по передней поверхности зуба фрезы;  $\alpha$  – передний угол зуба фрезы;  $\delta$  – угол наклона вектора центробежной силы инерции;  $F_{np}$  – сила принудительного воздействия на элемент стружки;  $\beta$  – угол наклона вектора силы  $F_{np}$

к передней поверхности зуба фрезы;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f_n$  – коэффициент трения элемента стружки по нижней поверхности фрезеруемого паза;  $r_{fp}$  – радиус фрезы.

Выполненный при помощи этой модели анализ позволил установить, что при обработке сталей и чугунов в рекомендуемом диапазоне геометрических параметров и режимов [4, 5] в 30...100 % случаев отсутствует возможность самоудаления элементов стружки за счет сил инерции ( $v_l < 0$ ).

3. Для исследования перемещения элемента стружки вдоль паза под действием гидродинамической силы принудительного воздействия разработана математическая модель ММ3 [8], позволяющая определять расстояние  $X$ , на которое перемещается элемент стружки в результате принудительного воздействия на него за пределами фрезы струи рабочей жидкости.

$$X = f_3(m, \rho_0, h, Q_n, F_n, d_0),$$

где  $m$  – масса элемента стружки;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $h$  – длина струи;  $Q_n$  – расход жидкости;  $F_n$  – сила трения по нижней поверхности паза;  $d_0$  – диаметр отверстия насадка.

4. Технологические операции фрезерования Т-образных пазов структурно обычно состоят из двух переходов – предварительной обработки (фрезерование прямоугольного паза дисковой или концевой фрезой) и окончательной обработки (фрезерование Т-образной фрезой). При обработке Т-образной фрезой отделенная стружка располагается с обеих сторон фрезы – в прямоугольном пазу (рис. 2 а) и в получаемом Т-образном (рис. 2 б).

Для исследования процесса заполнения стружкой пространства пазов разработана математическая модель ММ4 [9], позволяющая устанавливать момент заполнения каждого из указанных пазов.

А. Для прямоугольного паза (рис. 2 а)

$$L_1 = f_4(m, v_{e1}, F_n),$$

где  $L_1$  – длина обработки Т-образной фрезой, соответствующая заполнению прямоугольного паза стружкой;  $v_{e1}$  – скорость элемента стружки на выходе из пространства между зубьями.

Б. Для Т-образного паза

$$L_2 = f_4(x_n, d, c, \varepsilon, a, l, \theta_0),$$

где  $L_2$  – длина обработки, соответствующая заполнению Т-образного паза стружкой;  $x_n$  – расстояние, на которое перемещается элемент стружки за пределами фрезы под действием инерционных сил;  $c$  – высота Т-образного паза;  $\varepsilon$  – угол естественного откоса насыпного массива стружки.

Выполненный анализ позволил установить, что стружка заполняет пространство каждого из пазов через 10 – 30 мм обработки.

5. В случае несвоевременного удаления элементов стружки из них формируются тела волочения значительной длины (рис. 2).

Для определения потребного значения силы принудительного воздействия на тело волочения для его перемещения разработана математическая модель ММ5 [10].

Конечная зависимость ММ5 имеет вид

$$F_{np} = f_5(f, \rho_c, g, L_m, \gamma, d, c, n_\sigma, d_k),$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления перемещению стружки по пазу;  $\rho_c$  – плотность

стружки;  $L_m$  – длина тела волочения;  $\gamma$  – угол вектора силы принудительного воздействия;  $n_b$  – коэффициент бокового давления;  $d_k$  – диаметр концевой фрезы (или ширины на дисковой фрезе), используемой для предварительной обработки паза.

Выполненный анализ позволил установить, что  $F_{np}$  возрастает нелинейно – так, при увеличении длины тела волочения в 2 раза значение  $F_{np}$  возрастает почти в 10 раз.

#### **Экспериментальные исследования.**

Выполненные экспериментальные исследования позволили подтвердить адекватность разработанных частных и интегральной математических моделей и определить эффективность предложенных технических решений.

Экспериментальные исследования проведены в условиях натурального стенда, основой которого является широкоуниверсальный фрезерный станок 6М76П-1. На столе станка устанавливается и закрепляется универсальный тензометрический динамометр УДМ600 с обрабатываемой заготовкой. Сигналы, формируемые динамометром при фрезеровании Т-образного паза, передаются на регистрирующий комплекс при помощи линий передачи. Принятая и реализованная конструкция стенда и приборный комплекс позволяют измерять мгновенные значения силовых параметров [11], дифференциально и интегрально характеризующих процессы накопления и перемещения стружки во всем возможном диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров исследуемых устройств.

В соответствии с методикой проведения экспериментальных исследований [11], кроме измерения силовых параметров, выполнено измерение шероховатости обработанных поверхностей и износа зубьев инструмента при фрезеровании Т-образной фрезой  $\varnothing 21$  заготовок из материала Сталь 45 ГОСТ 1050-74 и СЧ18-36 ГОСТ 1412-79 для трех вариантов обработки:

- с принудительным удалением стружки напорной струей СОТС при одновременной реализации функций смазки и охлаждения – обработка «с удалением»;
- без принудительного удаления стружки, но с реализацией функций смазки и охлаждения – обработка «с поливом»;
- без применения СОТС (без принудительного удаления, а также без смазки и охлаждения) – обработка «всухую».

Диапазон варьирования режимов резания при проведении экспериментальных исследований определялся исходя из рекомендуемых [5] значений для испытания Т-образных фрез. Рекомендуемые значения принимались в качестве середины диапазона варьирования с последующим изменением в меньшую и большую стороны. Изменение в большую сторону осуществлялось до «ломающих» значений подачи.

Установлено, что применение предложенных технических решений обеспечивает повышение производительности обработки Т-образной фрезой в 2 раза – минутная подача  $S_m$  может быть увеличена от 100 до 200 мм/мин, что определяет соответствующее уменьшение основного времени обработки заготовки. При этом значения шероховатости боковых поверхностей обработанных пазов, хотя и незначительно повышаются, не выходят за пределы установленные стандартом [12].

Результаты измерений износа зубьев Т-образной фрезы по задней поверхности показали, что применение предложенных технических решений обеспечивает существенное увеличение стойкости режущего инструмента. А именно:

- обработка «с удалением» стружки обуславливает стойкость инструмента 30-35 минут до возникновения критического износа 0,3-0,4 мм;
- фрезерование «с поливом» обуславливает возможность обработки в течение гораздо меньшего времени – 7...10 минут, после чего наблюдается поломка зубьев;

– обработка «всухую» обуславливает еще меньшую стойкость режущего инструмента – 3...5 минут, после чего также наблюдается поломка зубьев.

Незначительное повышение стойкости при обработке «с поливом» в сравнении с обработкой «всухую» объясняется смазывающе-охлаждающим действием СОТС. Существенное повышение стойкости (на величину до 5 раз) при обработке «с удалением» стружки в сравнении с обработкой «с поливом» объясняется устранением повторного взаимодействия зубьев фрезы с циркулирующей стружкой.

### Выводы

Таким образом, увеличение стойкости режущего инструмента обуславливает уменьшение вспомогательного времени обработки заготовки, связанного с переточкой и заменой инструмента.

Достигнутое уменьшение основного времени обработки заготовки (за счет увеличения минутной подачи на величину до 2 раз) и вспомогательного (за счет увеличения стойкости режущего инструмента на величину до 5 раз) определяет существенное снижение себестоимости механической обработки заготовки, что свидетельствует об эффективности предложенных технических решений.

Основной результат работы заключается в установлении закономерностей, разработке зависимостей и математических моделей для создания и обоснования параметров устройств удаления стружки, обеспечивающих при минимальных затратах повышение производительности фрезерования закрытых профильных пазов.

**Список литературы:** 1. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE Observer, № 4 (13), 2003. – С. 6. 2. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 455 с. 3. И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз, Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. 4. Нечепаяев В. Г., Гнисько А. Н. Математична модель переміщення стружки різальним інструментом при фрезеруванні закритих профільних пазів. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 72-82. 5. ГОСТ 7063 – 72 (СТ СЭВ 115 – 79, СТ СЭВ 4632 – 84) Фрезы для обработки Т-образных пазов. Технические условия. – М.: Изд. стандартов, 1985. 6. Пат. 68794 А України, 7 В23Q11/02, В23Q11/10. Різальний інструмент: В.Г. Нечепаяев, Т.Г. Івченко, О.М. Гнисько (Україна). – № 2003109627; Заявл. 27.10.2003; Опубл. 16.08.2004, Бюл. № 8. – 3 с. 7. Нечепаяев В. Г., Гнисько А. Н. Системный подход к проектированию устройств удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. № 17. – С. 302-307. 8. Нечепаяев В., Гнисько А. Математическая модель эвакуации стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов // Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Vol. 4. Chisinau, Universitatea tehnica a Moldovei, 2005, p. 197-182. 9. Нечепаяев В.Г., Гнисько А.Н. Исследование процесса заполнения закрытых профильных пазов стружкой при их фрезеровании // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Вып. 29. – С. 229-238. 10. Нечепаяев В. Г., Гнисько А. Н. Разработка математической модели удаления стружки напорными струями СОТС при фрезеровании Т-образных пазов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. Вып.



21. – С.146-150. **11.** Нечепаяев В.Г., Гнитко А.Н. Методика проведения экспериментальных исследований фрезерования закрытых профильных пазов. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 110. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 33-41. **12.** ГОСТ 1574 – 91. Пазы Т-образные обработанные. Размеры. – М.: Изд. стандартов, 1992.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗАКРИТИХ ПРОФІЛЬНИХ ПАЗІВ НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ПРИМУСОВОГО ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ**

Нечепаяев В.Г., Гнитко О.М.

Розроблено нові технічні рішення пристроїв для примусового видалення стружки, що забезпечують підвищення продуктивності фрезерування закритих профільних пазів на величину до 2 разів. Розроблено часткові й інтегральна математичні моделі функціонування основних підсистем і модулів пристроїв примусового видалення стружки. Проведено експериментальні дослідження для підтвердження адекватності розроблених математичних моделей і визначення ефективності запропонованих технічних рішень.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ**

Нечепаяев В.Г., Гнитко А.Н.

Разработаны новые технические решения устройств для принудительного удаления стружки, обеспечивающие повышение производительности фрезерования закрытых профильных пазов на величину до 2 раз. Разработаны частные и интегральная математические модели функционирования основных подсистем и модулей устройств принудительного удаления стружки. Проведены экспериментальные исследования для подтверждения адекватности разработанных математических моделей и определения эффективности предложенных технических решений.

**INCREASE OF THE CLOSED PROFILE GROOVES MILLING EFFICIENCY ON THE BASIS OF PERFECTION OF SYSTEMS OF FORCED CHIP REMOVAL**

Nechepaev V.G., Gnitko A.N.

New technical decisions of devices for forced chip removal providing increase of closed profile grooves milling productivity up to 2 times are developed. The individual and integrated mathematical models of the basic subsystems functioning and modules of forced chip removal devices are developed. Experimental researches for confirmation of adequacy of the developed mathematical models and for determination of efficiency of the suggested technical decisions are carried out.

*Рецензент: к.т.н., доц. Полтавець В.В.*