

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ

**Нечепаяев В.Г., Гнистько А.Н.** (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Длина фрезерования закрытых и полузакрытых профильных (Т-образных, типа «ласточкин хвост» и т.п.), а также других пазов с затрудненным отводом стружки (далее ПЗОС), по выполненной оценке составляет:

- в Украине – около 4,5 км в год;
- в России – около 15 км в год;
- в мире – около 900 км в год.

Существенным резервом повышения производительности в этом случае является устранение ограничения по фактору несвоевременного удаления стружки из зоны обработки [1-3] и др. Одним из возможных путей устранения этого ограничения является принудительное удаление стружки при помощи устройств, использующих гидродинамический потенциал напорных струй жидкости, водо-воздушной смеси и т.д. [4]. В то же время, в известных работах в этой области [5, 6] и др. теоретические основы создания таких устройств не рассматриваются.

Для создания высокоэффективных образцов устройств [7], обеспечивающих принудительное удаление стружки при фрезеровании ПЗОС, выполнен комплекс теоретических исследований процессов накопления и удаления стружки при их обработке [8].

Подтверждение достоверности разработанных теоретических положений и определение эффективности созданных устройств удаления стружки требует проведения соответствующих экспериментальных исследований. Поскольку данных о проведении экспериментальных исследований в этом направлении не установлено, разработка методики их проведения является актуальным вопросом.

Специфика рассматриваемого вопроса определяет следующие основные направления проведения указанных экспериментальных исследований.

1. Исследование формирования силовых факторов при реализации рабочего процесса фрезерования ПЗОС.
2. Исследование износа рабочих поверхностей режущего инструмента при реализации рабочего процесса фрезерования ПЗОС.
3. Определение эффективности устройств удаления стружки.

Фрезерование ПЗОС в силу замкнутой конфигурации пазов характеризуется ограниченным доступом к зоне обработки, что существенно затрудняет создание устройств принудительного удаления отделенной стружки. Наиболее проблематичной в этом отношении является обработка Т-образных пазов. Поэтому эффективность предлагаемых технических решений целесообразно рассмотреть на примере именно этих пазов.

В качестве дифференциальных характеристик эффективности устройств принудительного удаления отделенной стружки приняты:

- силы резания, формирующиеся на рабочих поверхностях режущего инструмента. При отсутствии принудительного удаления элементов стружки из зоны обработки происходит их повторное резание инструментом, что обуславливает соответствующее изменение силы резания. Поэтому при проведении экспериментальных исследований анализ изменения силы резания характеризует эффективность устройств прину-

дительного удаления отделенной стружки;

– износ рабочих поверхностей режущего инструмента. При отсутствии принудительного удаления элементов стружки из зоны обработки происходит их повторное резание, что обуславливает повышенный (форсированный) износ рабочих поверхностей инструмента. Своевременное полное удаление стружки обуславливает существенное уменьшение износа. Поэтому при проведении экспериментальных исследований анализ интенсивности износа рабочих поверхностей режущего инструмента определяет эффективность устройств принудительного удаления отделенной стружки.

В качестве интегральных показателей эффективности устройств принудительного удаления отделенной стружки приняты:

– производительность фрезерования. При отсутствии принудительного удаления элементов стружки из зоны резания происходит их повторное резание, обуславливающее прирост силы резания и уменьшение максимально возможной подачи;

– качество обработки пазов. Качество обработки в данном случае характеризуется точностью размерной обработки и значением параметров состояния поверхностного слоя. При отсутствии принудительного удаления элементов стружки из зоны обработки происходит их повторное резание, что обуславливает повышенный износ рабочих поверхностей режущего инструмента, потерю точности размерной обработки и увеличение параметра шероховатости обработанных поверхностей.

Исследование формирования силовых факторов при реализации рабочего процесса фрезерования ПЗОС.

Значение и ориентация в пространстве сил, формирующихся на рабочих поверхностях режущего инструмента при фрезеровании Т-образных пазов, в общем случае определяются совокупностью большого числа факторов. Для установления необходимого перечня и уровней варьирования этих факторов при проведении экспериментальных исследований выполнен их анализ на основе концепции использования априорной информации и учета ее в принятии решений [9, 10].

Вся совокупность влияющих факторов разделена на следующие основные группы:

- технологические;
- конструктивные;
- режимные.

**Технологические факторы** (материал обрабатываемой заготовки, тип применяемой СОТС, материал режущей части фрезы).

Обработка ПЗОС находит широкое распространение в станкостроении при изготовлении металлообрабатывающего оборудования (МОО) и технологической оснастки (ТО). Наибольшее применение при изготовлении МОО и ТО имеют серые чугуны и конструкционные стали. Кроме того, согласно ГОСТ 7063 – 72 и ГОСТ 10673 – 75 [11, 12] испытания Т-образных фрез рекомендуется проводить на заготовках из серого чугуна СЧ 18 – 36 и стали марки 45. В соответствии с этим, для выполнения экспериментальных исследований приняты заготовки из стали 45 ГОСТ 1050 – 74 и чугуна СЧ 18 – 36 ГОСТ 1412-79.

Применительно к поставленным целям исследований, обработка Т-образных пазов осуществлялась по трем схемам:

- без использования СОТС;
- с подачей СОТС свободным поливом;
- с использованием напорных струй СОТС.

В арсенале современных методов металлообработки известно большое количе-

ство различных СОТС, рекомендуемых для различных условий. В то же время, выполненные исследования [8] позволяют сделать вывод о том, что эффективность функционирования устройств принудительного удаления стружки практически не зависит от химического состава СОТС. Поэтому при проведении экспериментальных исследований в качестве рабочей среды устройств принудительного удаления стружки принята вода, характеризующаяся минимальной экологической вредностью и стоимостью.

Для фрезерования Т-образных пазов в настоящее время изготавливаются фрезы двух типов [11, 12] – с режущей частью из быстрорежущей стали и с напаянными твердосплавными пластинами. В практике металлообработки находят применение фрезы обоих видов. Согласно выполненным исследованиям [8], материал режущей части фрез не оказывает практического влияния на эффективность функционирования устройств принудительного удаления стружки. Поэтому при проведении экспериментальных исследований приняты более дешевые стандартные фрезы с режущей частью из быстрорежущей стали Р6М3.

**Конструктивные факторы** (геометрия и размеры фрез).

В соответствии с [11, 12] Т-образные фрезы изготавливаются в диапазоне  $\varnothing 12,5 \dots 95$  мм с идентичными геометрическими параметрами. В результате выполненных теоретических исследований [8] установлено, что время и характер заполнения пространства между зубьями фрез отделенной стружкой практически не зависят от диаметров фрез в указанном диапазоне их изменения. Поэтому, с позиций достоверности и адекватности, для проведения экспериментальных исследований достаточно выбрать одно произвольное значение диаметра из указанного ряда. Для минимизации габаритов обрабатываемых заготовок и мощности используемого станочного оборудования принят Т-образный паз 12Н8 ГОСТ 1574-91, соответственно фрезы 2252–0155 диаметром  $\varnothing 21$  мм для обработки чугуна СЧ18-36 и 2252–0156 диаметром  $\varnothing 21$  мм для обработки стали 45.

**Режимные факторы** – параметры резания (скорость резания, подача, глубина резания); давление и расход жидкости устройств принудительного удаления стружки.

Диапазон варьирования режимов резания при проведении экспериментальных исследований определялся исходя из рекомендуемых их значений по [11, 12] для испытания Т-образных фрез (для фрезы  $\varnothing 21$  мм – скорость резания  $V = 15$  м/мин, подача на зуб  $S_z = 0,03$  мм/зуб при обработке чугуна;  $V = 25$  м/мин,  $S_z = 0,05$  мм/зуб при обработке стали). Эти значения принимались в качестве середины диапазона варьирования с последующим изменением в меньшую и большую стороны. Изменение в большую сторону осуществлялось до «ломающих» значений подачи.

Определение значений скорости резания при варьировании подачи осуществлялось согласно зависимости [13]

$$v = \frac{C_v \cdot d^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v, \quad (1)$$

где  $C_v, q, x, y, u, p, m$  – эмпирические коэффициенты;

$d$  – диаметр фрезы;

$T$  – период стойкости инструмента;

$t$  – глубина резания;

$B$  – ширина резания;

$z$  – число зубьев фрезы;

$K_v$  – поправочный коэффициент на скорость резания.

$$K_v = K_{mv} K_{nv} K_{uv},$$

где  $K_{mv}$  – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала;  
 $K_{nv}$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;  
 $K_{uv}$  – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

$$S_z = \frac{S_m}{z \cdot n}, \quad (2)$$

где  $S_m$  – минутная подача;  $n$  – частота вращения инструмента.

Поскольку органы управления фрезерных станков позволяют непосредственно изменять только минутную подачу, то выражение (1) с учетом известной зависимости (2) преобразовано к виду

$$v = \left( \frac{C_v \cdot d^{q-y} \cdot 1000^y \cdot z^{y-p} \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S_m^y \cdot \pi^y \cdot B^u} \right)^{\frac{1}{1-y}}.$$

Полученные значения режимов резания сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Значения режимов резания при обработке стали 45 (Т-образная фреза Ø21 мм с 6-ю зубьями)

$S_m$ , мм/мин	64	82	104	130	160	200
$S_z$ , мм/зуб	0,026	0,043	0,055	0,069	0,085	0,106
$n$ , об/мин	410	315	315	315	315	315
$V$ , м/мин	27	20	20	20	20	20

Таблица 2. Значения режимов резания при фрезеровании чугуна СЧ18-36 (Т-образная фреза Ø21 мм с 8-ю зубьями)

$S_m$ , мм/мин	64	82	104	130	160
$S_z$ , мм/зуб	0,031	0,050	0,063	0,100	0,166
$n$ , об/мин	255	205	205	160	120
$V$ , м/мин	17	14	14	10	8

Значение *давления и расхода жидкости* устройств принудительного удаления стружки принимались из условия гарантированного удаления стружки из зоны резания.

Важным аспектом планирования проведения экспериментальных исследований является выбор *условий их проведения*. Наиболее представительными условиями проведения экспериментальных исследований, связанных с механической обработкой, являются натурные условия, предусматривающие использование:

- полноразмерного станочного оборудования;
- стандартного режущего инструмента;
- заготовок из рекомендуемых стандартных материалов;
- интенсивных режимов обработки и др.

Указанным требованиям отвечает стенд, созданный в ДонНТУ (рис. 1). Основой

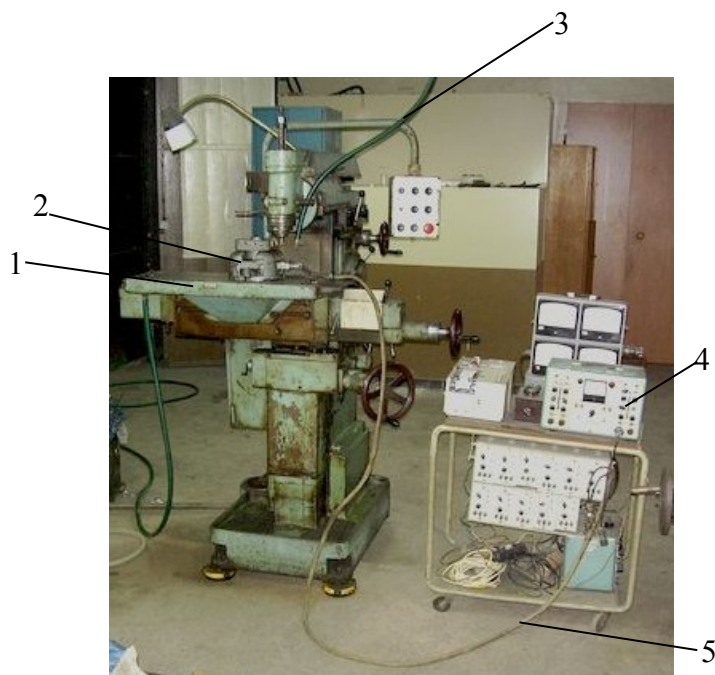


Рис. 1. Общий вид стенда для проведения экспериментальных исследований (1 – фрезерный станок 6М76П-1; 2 – динамометр УДМ600; 3 – устройство принудительного удаления стружки; 4 – регистрирующий комплекс; 5 – линии передачи

шпиндельной бабки – 16;

- пределы подач шпиндельной бабки -  $13 \div 395$  мм/мин;
- рабочая длина, ширина углового горизонтального стола – 800 мм, 250 мм;
- мощность электродвигателя привода шпинделя – 2,2 кВт.

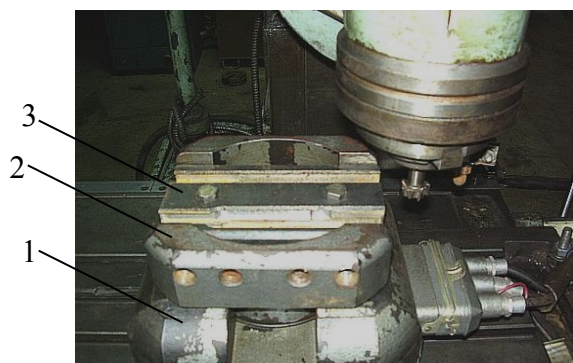


Рис. 2. Измерительное устройство (1 – УДМ 600; 2 – столик; 3 - заготовка)

электрических соединений.

Важным этапом разработки методики проведения экспериментальных исследований является обоснование и выбор силовых факторов для измерений.

На рис. 4 представлена схема расположения векторов некоторых составляющих силы резания при обработке Т-образной фрезой. Анализ схемы показывает, что горизонтальные составляющие  $P_{hi}$  силы резания на зубьях фрезы, находящиеся по разные

стенда является широкоуниверсальный фрезерный станок повышенной точности. Основные технические данные и характеристики станка:

- модель станка – 6М76П-1;
- класс точности – «П» по ГОСТ 8 – 71;
- количество скоростей горизонтального, вертикального шпинделей – 16;
- пределы частоты вращения горизонтального шпинделя –  $50 \div 1630$  об/мин;
- пределы частоты вращения вертикального шпинделя –  $63 \div 2040$  об/мин;
- количество продольных, вертикальных подач стола – 16;
- пределы продольных, вертикальных подач стола –  $13 \div 395$  мм/мин;
- количество подач

На горизонтальный стол станка устанавливается и закрепляется универсальный тензометрический динамометр УДМ600 (рис. 1, 2) с диапазоном измеряемых усилий 0...6000 Н. К динамометру крепится приспособление (столик) с обрабатываемой заготовкой. Электрические сигналы, формируемые динамометром при фрезеровании Т-образного паза, передаются на регистрирующий комплекс при помощи линий передач.

На рис. 3 показан общий вид регистрирующего комплекса и схема его электрических соединений.

стороны от предварительно обработанного прямоугольного паза (поз. 1), направлены противоположно. Вследствие этого, значение результирующего вектора этих составляющих силы резания  $\sum_{i=1}^n P_{hi}$  ( $n$  – количество зубьев фрезы, находящиеся одновременно в обработке) определяется их разностью. Поэтому измерение значения  $\sum_{i=1}^n P_{hi}$  не позволяет судить об изменении (увеличении, уменьшении) горизонтальных составляющих  $P_{hi}$ .



б)

Рис. 3. Регистрирующий комплекс а) и схема его электрических соединений б):  
1 - электрический разъем; 2 - тензоусилитель; 3 - показывающий прибор; 4 - избиратель пределов; 5 - переключатель входов; 6 - самописец НЗ38-1; 7 - динамометр УДМ-600

Вертикальные составляющие  $P_{vi}$  силы резания на зубьях фрезы, находящиеся по разные стороны от предварительно обработанного прямоугольного паза, направлены в одну сторону. Вследствие этого, значение результирующего вектора этих составляющих силы резания  $\sum_{i=1}^n P_{vi}$  определяется их суммой. Поэтому измерение значения  $\sum_{i=1}^n P_{vi}$  позволяет судить об изменении (увеличении, уменьшении) вертикальных составляющих  $P_{vi}$ .

Исследование износа рабочих поверхностей режущего инструмента при реализации рабочего процесса фрезерования ПЗОС.

При фрезеровании Т-образных пазов значение износа рабочих поверхностей режущего инструмента определялось при помощи микроскопа отсчетного типа МПБ-2 (предел измерения – 6,5 мм, цена деления шкалы – 0,05 мм, увеличение – 24-хкратное) с дискретностью замеров 200 мм длины обработки. Поскольку теоретическая зависимость значений износа рабочих поверхностей режущего инструмента от времени имеет явный нелинейный характер, то измерение значений износа производилось в полном диапазоне его изменения (от острозаточенного состояния до критического износа). Обработка заготовок осуществлялась по трем схемам:

- без использования СОТС;
- с подачей СОТС свободным поливом;
- с использованием напорных струй СОТС.

Определение эффективности устройств удаления стружки.

Эффективность устройств удаления стружки устанавливалась по производительности и качеству обработки.

Производительность фрезерования оценивалась по значению минутной подачи (установленной на станке).

Качество обработки оценивалось по точности размерной обработки и значению параметров состояния поверхностного слоя.

Точность размерной обработки оценивалась при помощи нутромера, а значение параметров состояния поверхностного слоя – при помощи профилографа-профилометра 252. Для определения параметров состояния поверхностного слоя обработанная заготовка разрезалась на две части вдоль паза (рис. 5).



Рис. 5. Схема определения параметров состояния поверхностного слоя

**Выводы.**

1. Для подтверждения достоверности разработанных теоретических положений и определения эффективности созданных устройств принудительного удаления отделенной стружки при фрезеровании пазов с затрудненным отводом стружки разработана методика проведения экспериментальных исследований, предусматривающая следующие основные этапы:

- исследование формирования силовых факторов при реализации рабочего про-



цесса фрезерования ПЗОС;

- исследование износа рабочих поверхностей режущего инструмента при реализации рабочего процесса фрезерования ПЗОС;

- определение эффективности устройств удаления стружки.

2. В качестве дифференциальных характеристик эффективности устройств принудительного удаления отделенной стружки приняты:

- силы резания, формирующиеся на рабочих поверхностях режущего инструмента;

- износ рабочих поверхностей режущего инструмента.

3. В качестве интегральных показателей эффективности устройств принудительного удаления отделенной стружки приняты:

- производительность фрезерования;

- качество обработки пазов. Качество обработки при этом характеризуется точностью размерной обработки и значением параметров состояния поверхностного слоя.

4. В соответствии с разработанной методикой варьированию подлежат режимные параметры (подача и скорость резания).

5. При проведении экспериментальных исследований фиксации подлежат следующие параметры: сумма вертикальных составляющих  $\sum_{i=1}^n P_{vi}$  силы резания, величины износа рабочих поверхностей режущего инструмента, значения размеров обработанных Т-образных пазов и параметры состояния их поверхностного слоя, минутная подача.

**Список литературы:** 1. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 455 с.

2. И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз, Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. 3. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE Observer, № 4 (13), 2003. – С. 6.

4. Нечепаяев В.Г., Гнисько А.Н. Предпосылки создания технологических систем с комплексным использованием СОТС// ИНЖЕНЕР: студенческий научно-технический журнал / Донецк: ДонГТУ, 2000. – № 1. – С. 74-77. 5. Власов А.Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.

6. Куприн А.И., Тихонцов А.М. Гидротранспорт стружки. М: Машиностроение, 1978. – 80 с. 7. 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. 8. Нечепаяев В. Г., Гнисько А. Н. Теоретические исследования процесса удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов. Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – Выпуск 69. – С. 211-218. 9. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики). – М.: Металлургия, 1978. – 112 с. 10. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике / Под ред. Креденцера Б.П. - К.: Техніка, 1984. – 200 с. 11. ГОСТ 7063 – 72 (СТ СЭВ 115 – 79, СТ СЭВ 4632 – 84). Фрезы для обработки Т-образных пазов. Технические условия. – М.: Изд. стандартов, 1985. 12. ГОСТ 10673 – 75. Фрезы с напаянными твердосплавными пластинами для обработки Т-образных пазов. Технические условия. – М.: Изд. стандартов, 1985. 13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., пере-



раб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986. – 282 с. 14. ГОСТ 1574 – 91. Пазы Т-образные обработанные. Размеры. – М.: Изд. стандартов, 1992.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗАКРИТИХ ПРОФІЛЬНИХ ПАЗІВ**

Нечепасєв В.Г., Гнисько О.М.

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень робочих процесів пристроїв видалення стружки із закритих профільних пазів при їх фрезеруванні.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ**

Нечепасев В.Г., Гнисько А.Н.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований рабочих процессов устройств удаления стружки из закрытых профильных пазов при их фрезеровании.

**TECHNIQUE OF EXPERIMENTAL RESEARCHES THE CLOSED PROFILE  
GROOVES MILLING CARRYING OUT**

Nechepaev V.G., Gnitko A.N.

The technique of experimental researches carrying out of a shaving removal devices working processes from the closed profile grooves at their milling is developed.

Рецензент: к.т.н., доц. Полтавец В.В.