

В.Г. Нечепаяев, д-р техн. наук, А.Н. Гнидько, канд. техн. наук,  
М.С. Мышов, Донецк, Украина

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ

*Виконаний аналіз складових похибки обробки профільного пазу (Т-подібний і типу «ластівчин хвіст») стосовно до завдання забезпечення заданої точності геометричних параметрів його поперечного перерізу. Аналіз дозволив зробити висновок, що похибка обробки, обумовлена повторною взаємодією профільних фрез із відділеною стружкою, становить істотну частину загальної похибки обробки профільних пазів. Усунення, або зниження похибки обробки, обумовленої повторною взаємодією профільних фрез із відділеною стружкою, є істотним резервом підвищення точності обробки профільних пазів.*

*Выполнен анализ составляющих погрешности обработки профильного пазу (Т-образный и типа «ласточкин хвост») применительно к задаче обеспечения заданной точности геометрических параметров его поперечного сечения. Анализ позволил сделать вывод, что погрешность обработки, обусловленная повторным взаимодействием профильных фрез с отделенной стружкой, составляет существенную часть общей погрешности обработки профильных пазов. Устранение, либо снижение погрешности обработки, обусловленной повторным взаимодействием профильных фрез с отделенной стружкой, является существенным резервом повышения точности обработки профильных пазов.*

*V.G. NECHEPAYEV, A.N. GNIDKO, M.S. MYSHOV*

*STATEMENT OF THE PROBLEM OF INCREASING THE ACCURACY OF PROFILE SLOTS  
PROCESSING*

*The analysis of components of an error of processing of a profile groove (T-shaped and type «ласточкин a tail») with reference to a problem of maintenance of the set accuracy of geometrical parameters of its cross-section section is made. The analysis has allowed to draw a conclusion, that the error of the processing caused by repeated interaction of profile mills with the separated shaving, makes an essential part of the general error of processing of profile grooves. Elimination, or decrease in an error of the processing caused by repeated interaction of profile mills with the separated shaving, is an essential reserve of increase of accuracy of processing of profile grooves.*

**Введение.** В изделиях станкостроения и общего машиностроения широкое применение находят профильные пазы с различной конфигурацией поперечного сечения. В столах станков различных типов, в плитах-спутниках, планшайбах, в конструкциях разнообразной технологической оснастки и т. д. преимущественно используются Т-образные пазы, пазы типа «ласточкин хвост» и угловые пазы.

Основной целью при проектировании и технологической подготовке производства таких изделий (также, как и производстве большинства изделий современного машиностроительного производства), является получение на этапе изготовления параметров, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства.

Применяемые в рассматриваемых изделиях профильные пазы, кроме закрепления деталей и приспособлений, одновременно выполняют также функ-

цию их ориентации относительно базовых элементов станка. Поэтому основным параметром, обуславливающим высокие эксплуатационные свойства изделий, является точность обработки пазов. А задача повышения качества изделий чаще всего сводится к минимизации погрешностей обработки пазов.

*Трудоемкость обработки профильных пазов составляет, по выполненной оценке [1], более половины трудоемкости обработки столов обрабатывающих центров, фрезерных, сверлильных, плоскошлифовальных и других станков. Таким образом, профильные пазы составляют значительную часть общего объема металлообработки при изготовлении металлообрабатывающего оборудования и технологической оснастки.*

При этом профильные пазы являются весьма нетехнологичными элементами конструкций, поскольку их конфигурация и принятая схема обработки обуславливают затрудненный отвод стружки.

Изложенное определяет актуальность задачи повышения точности профильных пазов на основе минимизации погрешностей их обработки.

**Основная часть.** Погрешность обработки можно рассматривать как результат нарушения заданного закона относительного движения технологических баз заготовки и рабочих поверхностей инструмента [2]. Минимизация нарушений закона относительного движения заготовки и инструмента достигается посредством статической и динамической настройки технологической системы [2].

Задачи статической и динамической настройки отличаются достижением заданного относительного положения и траектории движения рабочих поверхностей технологической системы соответственно без приложения рабочих нагрузок и при наличии рабочих нагрузок [2].

В общем случае суммарная геометрическая погрешность обработки

$$\omega = \omega_y + \omega_c + \omega_\partial, \quad (1)$$

где  $\omega_y$  – погрешность установки;  $\omega_c$  – погрешность статической настройки;  $\omega_\partial$  – погрешность динамической настройки.

$$\omega_y = \omega_\partial + \omega_{np} + \omega_3, \quad (2)$$

где  $\omega_\partial$  – погрешность базирования;  $\omega_{np}$  – погрешность приспособления;  $\omega_3$  – погрешность закрепления.

$$\omega_c = \omega_{ус.пр.} + \omega_{ус.ин.} + \omega_{пров}, \quad (3)$$

где  $\omega_{ус.пр.}$  – погрешность установки на станке приспособлений;  $\omega_{ус.ин.}$  – погрешность перемещения и установки режущих кромок инструмента относительно выбранных координатных плоскостей;  $\omega_{пров}$  – погрешность проверки точности статической настройки после фиксации требуемого положения режущего инструмента и приспособлений.

$$\omega_\partial = \omega_m + \omega_{прит} + \omega_{деф} + \omega_{виб} + \omega_{инс} + \omega_{темн} + \omega_{вн.напр.} + \omega_{раб}, \quad (4)$$

где  $\omega_m$  – погрешность, возникающая из-за отклонений параметров качества

материала;  $\omega_{прит}$  – погрешность, возникающая из-за отклонений припусков на обработку;  $\omega_{деф}$  – погрешность, возникающая из-за деформаций системы СПИД;  $\omega_{виб}$  – погрешность, возникающая из-за вибраций, возникающих при обработке;  $\omega_{инс}$  – погрешность, возникающая из-за размерного износа инструмента;  $\omega_{темн}$  – погрешность, возникающая из-за температурных деформаций системы СПИД;  $\omega_{вн.напр}$  – погрешность, возникающая из-за деформации деталей вследствие перераспределения внутренних напряжений;  $\omega_{раб}$  – погрешность, возникающая из-за влияния рабочего на качество продукции.

$$\omega_{деф} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4, \quad (5)$$

где  $\omega_1$  – погрешность, вызванная упругими перемещениями станка;  $\omega_2$  – погрешность, вызванная упругими перемещениями детали в процессе обработки;  $\omega_3$  – погрешность, вызванная упругими перемещениями узлов, несущих инструмент;  $\omega_4$  – погрешность, вызванная упругими деформациями режущего инструмента.

Таким образом, суммарная геометрическая погрешность обработки в общем случае равна

$$\omega = \omega_\partial + \omega_{np} + \omega_3 + \omega_{ус.пр.} + \omega_{ус.ин.} + \omega_{пров} + \omega_m + \omega_{прит} + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_{виб} + \omega_{инс} + \omega_{темн} + \omega_{вн.напр.} + \omega_{раб}. \quad (6)$$

Выполним анализ составляющих зависимости (6) применительно к задаче обеспечения заданной точности геометрических параметров поперечного сечения профильного паза (Т-образный и типа «ласточкин хвост»). Результаты анализа сведены в таблицу 1.

Рассмотрим наиболее распространенную схему построения технологического процесса обработки профильных пазов:

1 этап – обработка прямоугольного паза дисковой фрезой с горизонтальной осью вращения (рис. 1а);

2 этап – обработка профильного паза Т-образной фрезой (рис. 1б) или фрезой типа ласточкин хвост (рис. 1в).

1) Погрешность установки  $\omega_y = 0$ , поскольку при всех общепринятых схемах базирования и закрепления при обработке составляющие  $\omega_\partial$ ,  $\omega_{np}$  и  $\omega_3$  отсутствуют. (Следует отметить, что при рассмотрении вопроса точности расположения пазов относительно базовых поверхностей стола и относительно друг друга, параллельности пазов, прямолинейности и др., значения  $\omega_\partial$ ,  $\omega_{np}$  и  $\omega_3$  не равны нулю).

2) Погрешность статической настройки  $\omega_c$ . Определяется значениями  $\omega_{ус.пр}$  и  $\omega_{пров}$  и проявляется в виде несимметричности расположения боковых поверхностей пазов относительно их вертикальных осей.

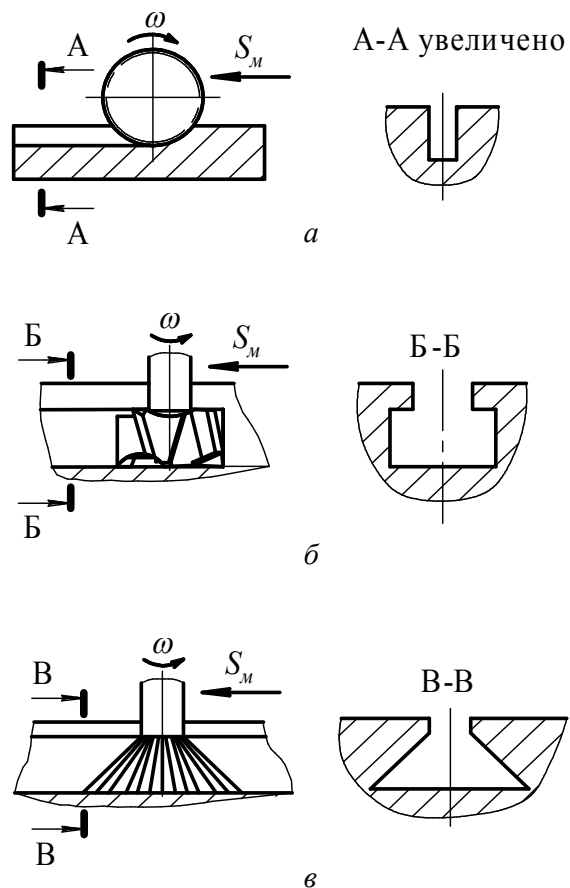


Рисунок 1 – Этапы обработки профильных пазов:  
 а) дисковой фрезой прямоугольного паза; б) профильной фрезой Т-образного паза;  
 в) профильной фрезой паза типа «ласточкин хвост»

Значение  $\omega_c$  может быть минимизировано за счет соответствующей настройки и поднастройки станка.

3) Погрешность динамической настройки  $\omega_d$ . Составляющие  $\omega_m$ ,  $\omega_{прп}$ ,  $\omega_{виб}$ ,  $\omega_{инс}$ ,  $\omega_{темп}$ ,  $\omega_{вн.напр.}$  и  $\omega_{раб}$  равны нулю, либо практически могут быть сведены к нулевому значению при правильной организации и подготовке технологического процесса.

Составляющие погрешности, возникающей из-за деформации системы СПИД  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ , также равны нулю либо практически могут быть сведены к нулевому значению при правильном подборе станочного оборудования.

Погрешность  $\omega_4$  можно представить в виде

$$\omega_4 = \omega_4^{pez} + \omega_4^{pez.cmp.},$$

где  $\omega_4^{pez}$  – погрешность вследствие упругих деформаций режущего инструмента, вызванных отделением стружки на 2-м этапе обработки профильного паза;  $\omega_4^{pez.cmp.}$  – погрешность вследствие упругих деформаций режущего инструмента, вызванных повторным взаимодействием зубьев фрезы с отделенной стружкой на 2-м этапе обработки профильного паза.

Погрешность  $\omega_4^{pez}$  применительно к рассматриваемому вопросу обусловлена соответствующей ориентацией составляющих силы резания (рис. 2).

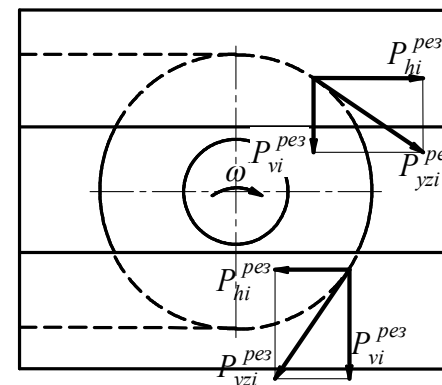
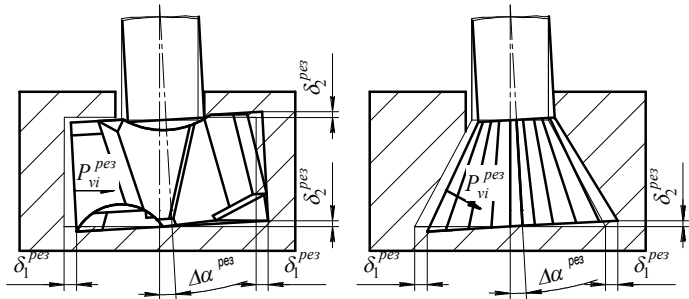


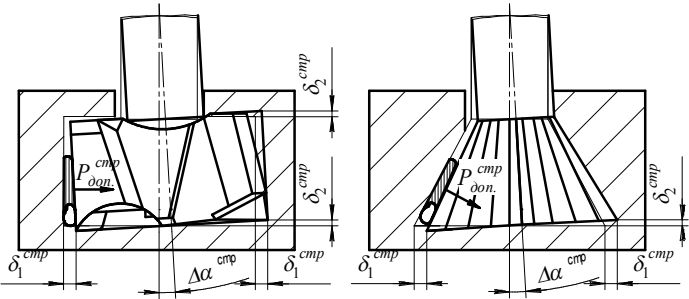
Рисунок 2 – Схема расположения составляющих сил резания

На рис. 2 показано, что вертикальные составляющие сил резания  $P_{vi}^{pez}$  направлены в одну сторону и определяют соответствующую деформацию режущего инструмента  $\Delta\alpha^{pez}$ , рис. 3а. Профильную фрезу (Т-образная или типа «ласточкин хвост») в данном случае можно схематизировать в виде консольной балки. При консольном закреплении упругой балки и нагружении ее поперечной силой перемещение от приложенной нагрузки имеет линейный характер. Угловая деформация оси фрезы  $\Delta\alpha^{pez}$  в свою очередь вызывает систематические постоянные погрешности обработки паза  $\delta_1^{pez}$  и  $\delta_2^{pez}$  (рис. 3а).

Значения указанных погрешностей практически не могут быть уменьшены без снижения режимов обработки.



а



б

Рисунок 3 – Деформация Т-образной фрезы и фрезы типа «пласточкин хвост» вследствие: а) действия вертикальной составляющей  $P_{vi}^{pez}$  силы резания; б) повторного взаимодействия с отделенной стружкой

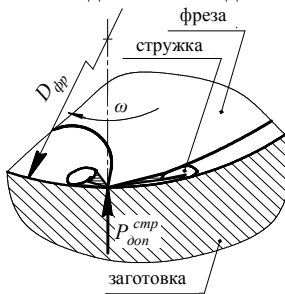


Рисунок 4 – Схема процесса повторного взаимодействия режущего инструмента с отделенной стружкой

Погрешность  $\omega_4^{pez,стр.}$  обусловлена повторным взаимодействием режущего инструмента с отделенной стружкой [1]. Механизм этого явления поясняется рис. 4.

Направление вектора  $P_{доп}^{стр}$  (рис. 4, рис. 3б) совпадает с направлением вектора вертикальной составляющей  $P_{vi}^{pez}$  силы резания  $P_{yzi}^{pez}$ . Поэтому

погрешность обработки, вызванная действием силы  $P_{доп}^{стр}$ , арифметически суммируется с погрешностью, вызванной деформацией инструмента под действием составляющей  $P_{vi}^{pez}$ , существенно усугубляя ее.

Значение силы  $P_{доп}^{стр}$ , согласно данным [3], составляет до 25 % от значения силы  $P_{vi}^{pez}$ . Таким образом, в первом приближении можно предположить, что деформация инструмента  $\Delta\alpha^{стр}$  и погрешность обработки  $\delta_1^{стр}$  и  $\delta_2^{стр}$  (рис. 3б), обусловленные повторным взаимодействием стружки с инструментом, будут пропорционально увеличиваться. Погрешность обработки в этом случае имеет системный переменный характер.

Для определения значений указанных погрешностей с достаточной точностью, необходимо выполнить моделирование и анализ деформирования

Таблица 1 – К анализу общей погрешности размеров поперечного сечения профильного паза

Составляющие общей погрешности		Наличие и характер погрешнос
1	Погрешность установки, $\omega_y$	
	1.1 Погрешность базирования, $\omega_b$	–
	1.2 Погрешность закрепления, $\omega_z$	–
	1.3 Погрешность приспособления, $\omega_{пр.}$	–
2	Погрешность статической настройки технологической системы, $\omega_c$	
	2.1 Погрешность установки на столе приспособлений, $\omega_{с.пр.}$	+
	2.2 Погрешность перемещения и установки режущих кромок инструмента, $\omega_{с.ин.}$	+
	2.3 Погрешность проверки точности статической настройки после фиксации требуемого положения режущего инструмента и приспособлений, $\omega_{пров.}$	+
3	Погрешность динамической настройки технологической системы, $\omega_d$	
	3.1 Погрешность, возникающая из-за неоднородности обрабатываемого материала, $\omega_m$	–
	3.2 Погрешность, возникающая из-за отклонений припусков на обработку, $\omega_{прип.}$	–
	3.3 Погрешность, возникающая из-за деформаций системы СПИД $\omega_{деф.}$	
	3.3.1 Погрешность, вызванная упругими перемещениями станка, $\omega_1$	–
	3.3.2 Погрешность, вызванная упругими перемещениями детали в процессе обработки, $\omega_2$	–
	3.3.3 Погрешность, вызванная упругими перемещениями узлов, несущих инструмент, $\omega_3$	+
	3.3.4 Погрешность, вызванная упругими деформациями режущего инструмента, $\omega_4$	*
3.4 Погрешность, возникающая из-за вибраций при обработке, $\omega_{виб.}$	–	

Продолжение таблицы 1

3.5	Погрешность, возникающая из-за размерного износа инструмента, $\omega_{изс}$	–
3.6	Погрешность, возникающая из-за температурных деформаций системы СПИД, $\omega_{темт}$	–
3.7	Погрешность, возникающая из-за деформаций деталей вследствие перераспределения внутренних напряжений, $\omega_{вн.напр}$	–
3.8	Погрешность, возникающая из-за влияния рабочего на качество продукции, $\omega_{раб}$	–

«–» - погрешность отсутствует при любом варианте базирования;

«+» - погрешность может быть устранена при правильном выборе оборудования, баз и настроек инструмента;

«\*» - устранение погрешности требует принятия специальных мер.

режущего инструмента вследствие повторного взаимодействия зубьев фрезы с отделенной стружкой.

### Выводы.

1. Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что погрешность обработки, обусловленная повторным взаимодействием профильных фрез с отделенной стружкой, составляет существенную часть общей погрешности обработки Т-образных и типа «ласточкин хвост» пазов.

2. Устранение, либо снижение погрешности обработки, обусловленной повторным взаимодействием профильных фрез с отделенной стружкой, является существенным резервом повышения точности обработки профильных пазов.

3. Принудительное удаление отделенной стружки, устраняющее повторное взаимодействие ее с режущим инструментом, является перспективным путем повышения точности обработки профильных пазов.

**Список использованных источников:** 1. *Нечепаяев В.Г.* Эффективность применения устройств удаления стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов / *В.Г. Нечепаяев, А.Н. Гнитко* // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво: матеріали сьомої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції.* Одеса: ОНПУ, 29-31 жовтня 2007 р. – Одеса, 2007. – С. 43-44. 2. *Базров Б.М.* Основы технологии машиностроения: [учебник для вузов] / *Б.М. Базров.* – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с. 3. *Нечепаяев В.Г.* Результаты экспериментальных исследований фрезерования профильных пазов / *В.Г. Нечепаяев, А.Н. Гнитко* // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць.* – Краматорськ-Київ: ДДМА, 2006. – Вип. 20. – С. 54-62.

*Поступила в редколлегию 08.04.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Nechepaev V.G.* Jeffectivnost' primenenija ustrojstv udalenija struzhki pri frezerovanii zakrytyh profil'nyh pazov / *V.G. Nechepaev, A.N. Gnit'ko* // *Mashinobuduvannja Ukraïni ochima molodih: progresivni ideï-nauka-virobnictvo: materialy s'omoï vseukraïns'koï molodizhnoï naukovo-tehnichnoï konferencii.* Odesa: ONPU, 29-31 zhovtnja 2007 r. – Odesa, 2007. – S. 43-44. 2. *Bazrov B.M.* Osnovy tehnologii mashinostroenija: [uchebnik dlja vuzov] / *B.M. Bazrov.* – M.: Mashinostroenie, 2005. – 736 s. 3. *Nechepaev V.G.* Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij frezerovanija profil'nyh pazov / *V.G. Nechepaev, A.N. Gnit'ko* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: zbirnik naukovih prac'.* – Kramators'k-Kiïv: DDMA, 2006. – Vip. 20. – S. 54-62.