

УДК 621.914.1



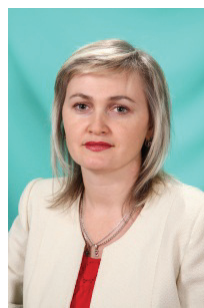
Ю.Н. Внуков
д.т.н., профессор,
Запорожский
национальный
технический
университет
yvnukov@zntu.edu.ua



А.И. Гермашев
аспирант,
Запорожский
национальный
технический
университет
germashevanton@mail.ru



П.А. Каморкин
к.т.н., доцент,
Запорожский
национальный
технический
университет
kamorkin@mail.ru



Е.Б. Козлова
ст. преподаватель,
Запорожский
национальный
технический
университет
kozlova@zntu.edu.ua

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ
ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, П.А. Каморкин, Е.Б. Козлова. Оценка эффективности и качества обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании. Рассмотрена методология экспериментального измерения условий срезания припуска и формирования параметров качества обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании. Показано влияние условий концевого финишного фрезерования тонкостенных деталей на эффективность и размерную точность удаления назначенного припуска.

Y.N. Vnukov, A.I. Germashev, P.A. Kamorkin, E.B. Kozlova. Efficiency and surface condition assessment of thin wall end milling. This article presents experimental methodology of measurement cutting conditions and surface finish formation in thin wall end milling. Also thin walls end milling influence on efficiency and dimensional accuracy is shown.

В авиакосмической отрасли широко применяются детали, имеющие тонкостенные элементы, которые получают путем фрезерования на современных станках с ЧПУ. Обработка таких деталей, ввиду их невысокой жесткости, приводит не только к появлению вибраций, ухудшающих

Технології, матеріали, транспорт і логістика

шероховатість обробленої поверхності, но и к значительному снижению размерной точности.

Из-за упругой деформации детали, установленный припуск снимается не полностью, приводя к отклонениям формы и расположения номинального профиля.

Целью настоящей статьи является установление закономерностей влияния условий конечного финишного фрезерования тонкостенных деталей на эффективность и размерную точность удаления назначенного припуска. На рис. 1 приведена схема исследования процессов конечного фрезерования тонкостенной детали.

Принципиальной особенностью этой схемы является возможность разделения зоны обработки и упругой системы (УС) тонкостенной детали. Такой подход позволяет отдельно рассматривать процессы силового воздействия в зоне обработки – 4 от различных условий резания, при одинаковых статических и динамических характеристиках УС детали. И наоборот, оценивать влияние изменения статических и динамических характеристик УС детали при неизменных условиях резания. На рис.1 показан образец из обрабатываемого материала – 3, который жестко крепится на торце прямоугольной пластины – 1, моделирующей УС тонкостенной детали. Упругая пластина 1 установлена в специальном приспособлении – 6, которое жестко закреплено на рабочем столе фрезерного станка [1].

Изменением размеров пластины ($L \times B \times h$) можно моделировать различные статические и динамические свойства тонкостенной детали. Более того, возможна установка дополнительной массы на пластине, а также окружение ее демпфирующей средой, что позволяет исследовать условия обработки тонкостенных деталей в широком диапазоне изменения их характеристик.

При фрезеровании, в результате действия силы отжима $P_{от}$ со стороны фрезы, происходит перемещение образца – 3, величину которого измеряют датчиком перемещения – 2 по изменению зазора - Δ .

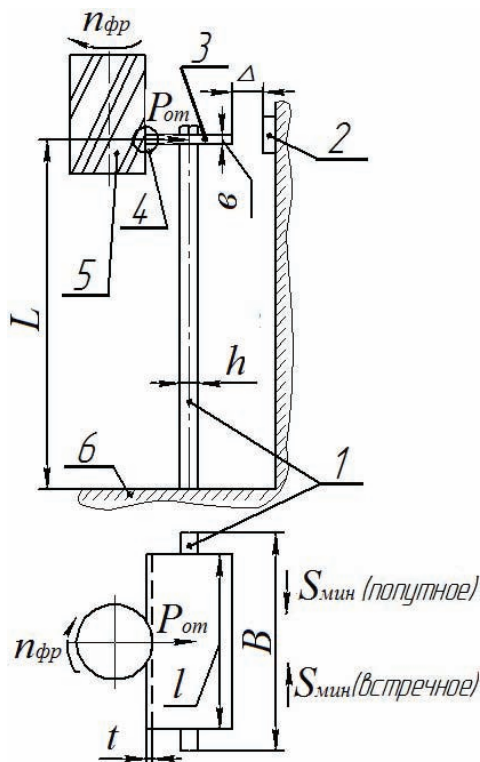
Режим обработки задается изменением числа оборотов шпинделя n [об/мин], величиной снимаемого припуска – t [мм], шириной фрезерования b [мм], а также величиной и направлением (встречное и попутное) подачи $S_{мин}$ [мм/мин].

Для измерения фактического объема удаленного припуска и профиля обработанной поверхности образца, разработано устройство, показанное на рисунке 2. Основание устройства – 1 жестко закреплено на вертикальной стойке фрезерного станка недалеко от зоны фрезерования.

На основании 1 жестко закреплены индикаторные часы (ИЧ-10), у которых имеется наконечник с радиусом $r=0,05$ мм – 3 для контакта с обрабатываемой и обработанной поверхностью и пяточка - 2. Индуктивный

датчик жорстко закріплен на основанні 1, він дозволяє з високою точністю записувати профіль обробленої поверхні зразка (при продольному переміщенні стола) і визначати фактичний об'єм удаленого при фрезеруванні припуску.

На рис. 3в приведена методика оцінки розмірної точності обробки (в відповідності з ГОСТ 24642-81).

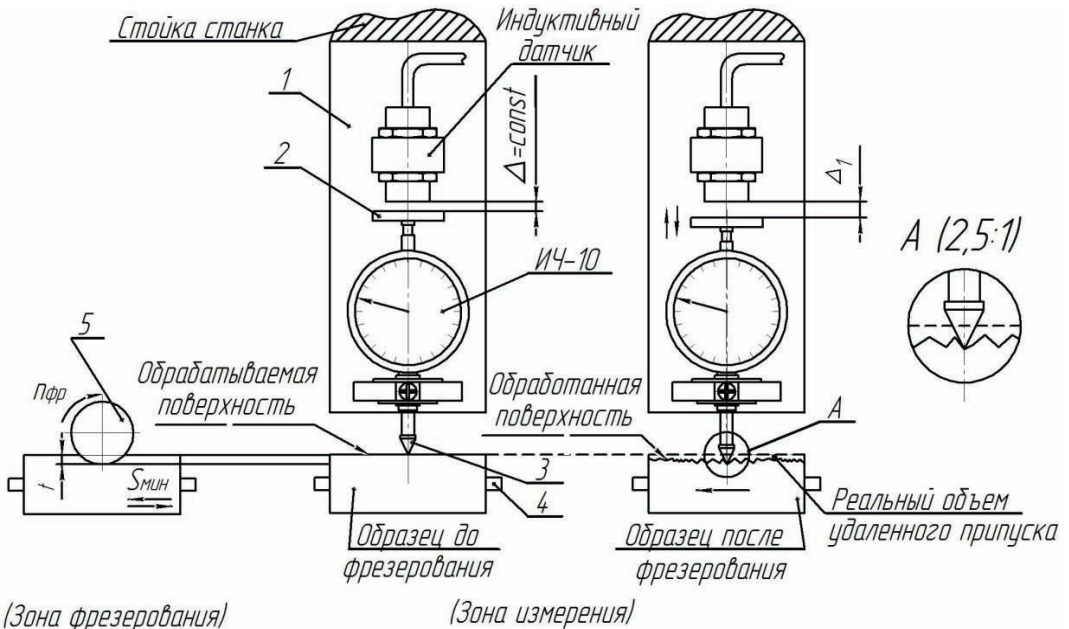


- 1 – Упругая система (УС) тонкостенной детали (пластина); 2 – Датчик перемещения обрабатываемого образца; 3 – Обрабатываемый образец; 4 – Зона обработки фрезерованием; 5 – Концевая фреза; 6 – Приспособление для крепления пластины

Рис. 1 Схема экспериментальной установки для исследования концевой фрезерования тонкостенной детали

В основу нормирования положен принцип **прилегающей прямой**, которая имеет форму номинального профиля (прямой), расположена вне материала детали так, чтобы отклонение от нее наиболее удаленной точки реального профиля в пределах нормируемого участка имело минимальное значение. Оценку точности проводят по двум критериям: отклонение от прямолинейности в плоскости EFL и отклонению формы заданного профиля ECL.

• Отклонение от прямолинейности в плоскости EFL – это наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей прямой в пределах нормируемого участка.



1 – Основание устройства; 2 – Пяточка; 3 – Наконечник; 4 - УС тонкостенной детали (пластина); 5 – фреза; t – припуск на обработку

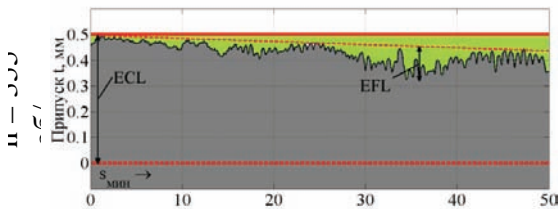
Рис. 2 Схема устройства для измерения удаленного припуска и профиля обработанной поверхности

• Отклонение формы заданного профиля ECL – это наибольшее отклонение точек реального профиля от номинального профиля, определяемое по нормали к номинальному профилю в пределах нормируемого участка.

Объем фактического удаленного припуска отличается от его теоретического значения, т.к. тонкостенная деталь имеет невысокую жесткость и под действием силы резания упруго отклоняется.

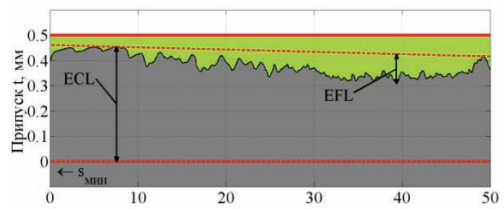
Встречное фрезерование

Попутное фрезерование



Длина обработки l , мм

а)



Длина обработки l , мм

б)

Технології, матеріали, транспорт і логістика

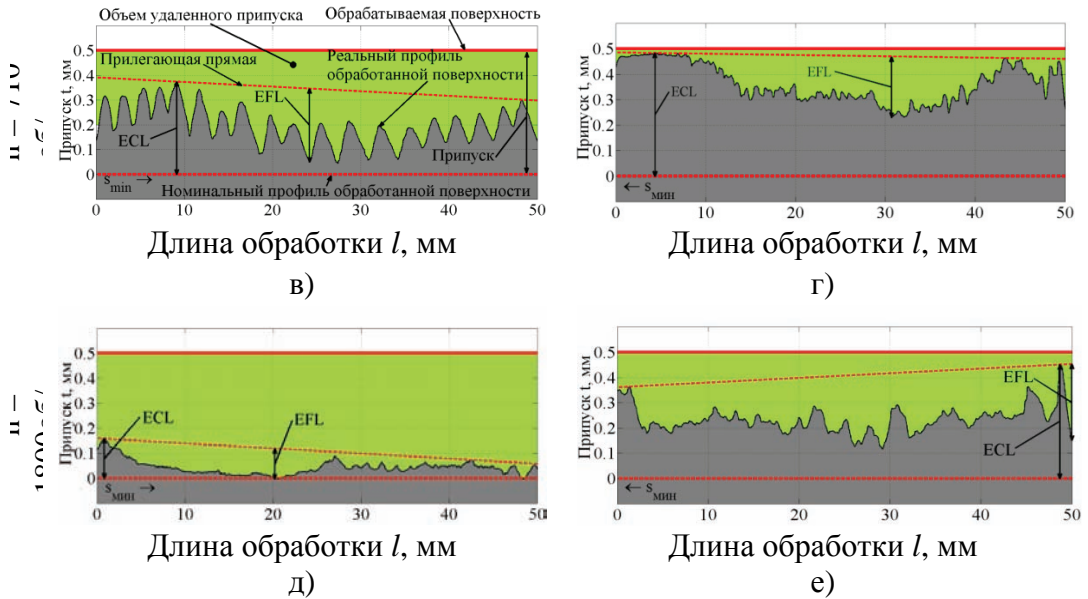


Рис. 3 Измерение объема удаленного припуска и профиля обработанной поверхности для расчета размерной точности по ГОСТ 24642-81

Теоретическую производительность обработки Q_T равную удалению всего объема установленного припуска в единицу времени можно определить по формуле (1):

$$Q_T = b \cdot t \cdot S_{\text{мин}} \quad (1)$$

где: b – ширина образца, мм;

t – припуск, мм;

$S_{\text{мин}}$ – минутная подача, мм/мин.

Измерив фактический объем удаленного припуска можно определить фактическую производительность Q_ϕ . Отношение (2) показывает эффективность удаления припуска при фрезеровании тонкостенной детали в процентах(%):

$$\mathcal{E}_\phi = \frac{Q_\phi \cdot 100}{Q_T} \quad (2)$$

Экспериментальные исследования процесса финишного концевой фрезерования тонкостенной детали проводили при следующих условиях:

а) **Оборудование** - универсально фрезерный станок модели FWD – 32J;

б) **Инструмент** - концевая 3х зубая фреза CANELAD20 Z3 со сменными многогранными неперетачиваемыми пластинками из твердого сплава АРКТ100305PDERJC8050 фирмы Dijet. В эксперименте устанавливался 1 режущий зуб. Вместо двух других зубьев устанавливались равные по весу свинцовые грузики, обеспечивающие балансировку фрезы. Геометрия режущего зуба: $\gamma=6^\circ$, $\alpha=11^\circ$, $\lambda^\circ=-10^\circ$.

в) **Образец из обрабатываемого материала** размером 50×20×2 (Ст. 3кп ГОСТ 380-2005).

г) **Упругая система тонкостенной детали.** Пластина с размерами вылета $L=80\text{мм}$, $B=60\text{мм}$, $h=4\text{мм}$. Материал Сталь 65Г (HRC 60). Вместе с закрепленным образцом УС тонкостенной детали имеет следующие характеристики: жесткость $j=228,1\text{ Н/мм}$, частота собственных колебаний $f=264\text{ Гц}$, логарифмический декремент затухания колебаний – 0,091.

д) **Режимы фрезерования:**

- скорость вращения шпинделя от $n=224$ до 1800 об/мин;
- продольная подача стола от $S_{\text{мин}}=11,2$ до 90мм/мин;
- подача на зуб $S_z=0,05\text{ мм/зуб}$;
- ширина среза $b=2\text{мм}$;
- глубина фрезерования (припуск) $t=0,5\text{мм}$;
- направление подачи – встречное и попутное;
- условие резания – свободное, косоугольное.

Результаты измерения эффективности удаления припуска, размерной точности и шероховатости приведены в таблице 1 и на рис. 4-8. Сравнение фактической производительности удаления припуска (Q_ϕ) при различных скоростях вращения шпинделя показывает (рис. 4), что направление подачи существенно влияет на этот показатель, который значительно ниже, чем теоретическая производительность. Эффективность удаления припуска (рис. 5) почти в два раза выше при встречном фрезеровании, по сравнению с попутным.

Это в первую очередь связано с особенностями срезания стружки переменной толщины от максимальной к минимальной при попутном и наоборот при встречном.

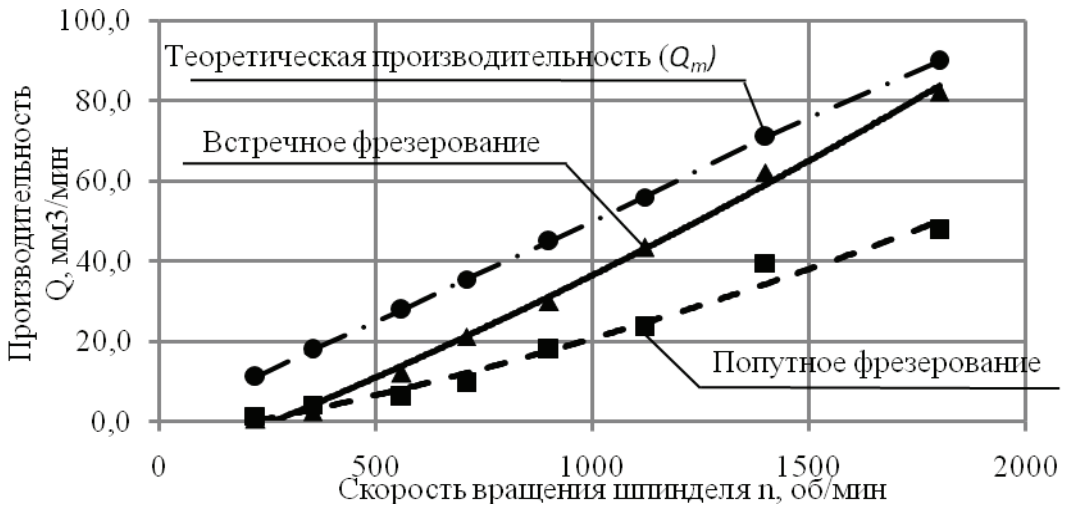


Рис. 4 Фактическая производительность удаления припуска (Q_f) при встречном и попутном фрезеровании тонкостенной детали

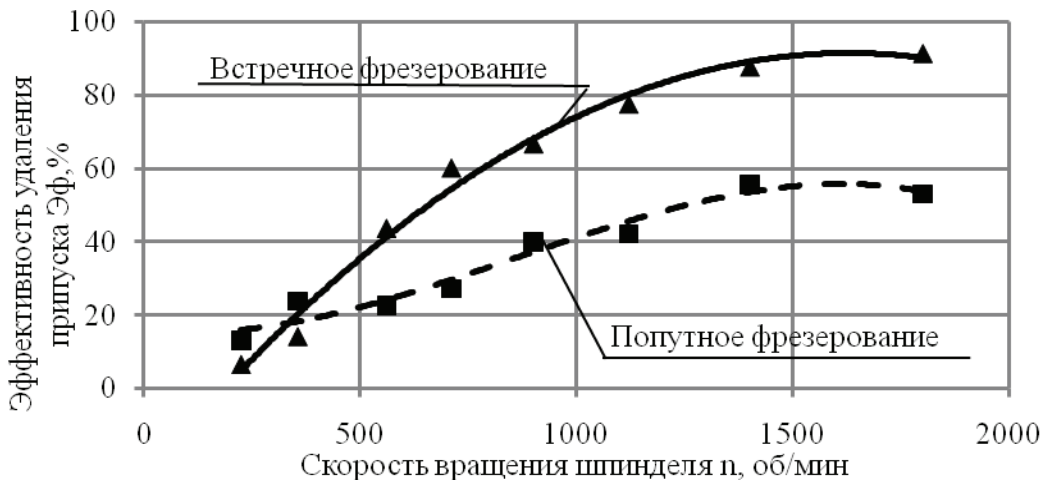


Рис. 5 Эффективность удаления припуска при встречном и попутном фрезеровании тонкостенной детали

Таблица 1 - Результаты измерения эффективности удаления припуска, размерной точности и шероховатости

Показатели		Скорость вращения шпинделя n , об/мин							
		224	355	560	710	900	1120	1400	1800
Подача $S_{мин}$, мм/мин		11,2	18	28	35,5	45	56	71	90
Теоретическая производительность обработки Q_t , мм ³ /мин		11,2	18	28	35,5	45	56	71	90
Встречнофрезерование	Фактическая производительность Q_f , мм ³ /мин	0,7	2,6	12,2	21,3	30,0	43,4	62,2	82,2
	Эффективность удаления припуска \mathcal{E}_f , %	6,6	14,2	43,7	60,1	66,7	77,5	87,6	91,3
	Отклонение от прямолинейности в плоскости EFL, мм	0,06	0,13	0,27	0,3	0,3	0,22	0,19	0,12
	Отклонение формы заданного профиля ECL, мм	0,49	0,5	0,42	0,37	0,36	0,27	0,27	0,16
	Шероховатость R_a , мкм	4,6	16	31,3	37,7	37,2	14,1	2,7	4,2
Попутнофрезерование	Фактическая производительность Q_f , мм ³ /мин	1,4	4,3	6,3	9,6	18,0	23,6	39,6	47,8
	Эффективность удаления припуска \mathcal{E}_f , %	12,9	23,7	22,6	27,1	40	42,2	55,8	53,1
	Отклонение от прямолинейности в плоскости EFL, мм	0,06	0,12	0,2	0,24	0,32	0,29	0,36	0,3
	Отклонение формы заданного профиля ECL, мм	0,5	0,46	0,47	0,48	0,47	0,45	0,44	0,45
	Шероховатость R_a , мкм	5	9,4	11,4	10,8	21,2	24,9	34	21,9

Технології, матеріали, транспорт і логістика

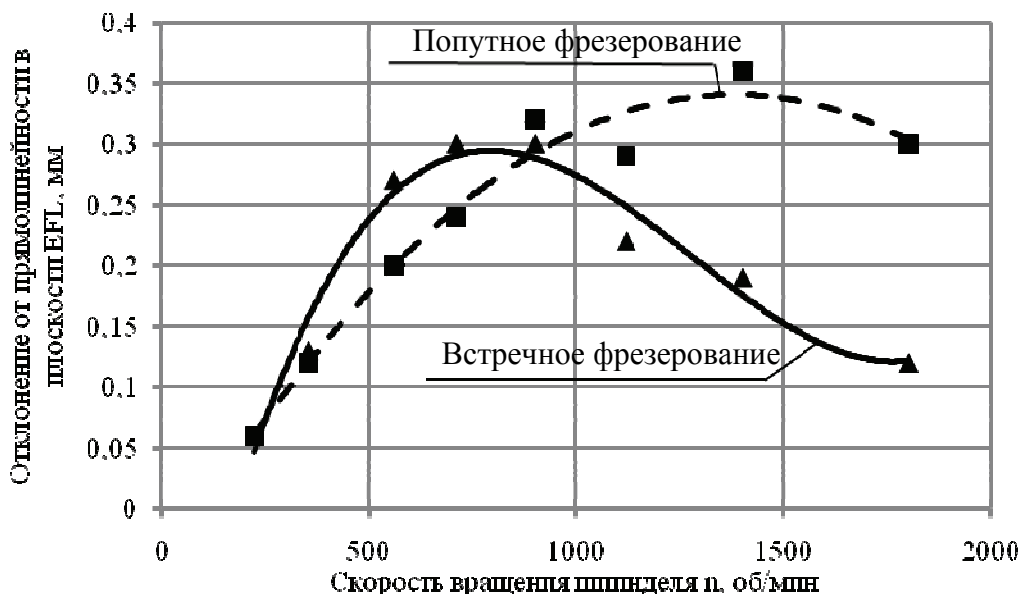


Рис. 6 Влияние направления фрезерования (встречное, попутное) на величину отклонения от прямолинейности в плоскости EFL

Влияние направления подачи на характеристику отклонения от прямолинейности в плоскости EFL (рис. 6) показывает, что до скорости вращения шпинделя $n < 900$ об/мин при встречном фрезеровании этот показатель выше, а с увеличением скорости $n \geq 900$ об/мин наблюдается его значительное снижение. Это явление подробно изучено в работе [2], где показано, что при концевом фрезеровании тонкостенных деталей, помимо вынужденных колебаний, связанных с входом и выходом зуба фрезы в припуск, в определенном скоростном диапазоне возникают автоколебания. Природа этих колебаний связана с появлением волнистости на поверхности резания. Поэтому к переменной толщине среза, характерной для цилиндрического фрезерования, добавляется дополнительное изменение толщины среза, связанное с регенерацией, т.е. резанием по вибрационному следу от предыдущего прохода зуба. Скоростной диапазон и интенсивность регенеративных колебаний при встречном и попутном фрезеровании неодинакова. Датчик перемещений – 2 (рис. 1) позволяет получать осциллограммы регенеративных колебаний при срезании припуска каждым зубом фрезы и определять скоростные зоны и интенсивность их появления. Для рассматриваемых условий при встречном фрезеровании регенеративные колебания появляются в зоне скоростей от $n=560$ об/мин до $n=1120$ об/мин, а при попутном от $n=710$ об/мин до $n=1400$ об/мин. Регенеративные колебания приводят к появлению регулярной волнистости на профилограммах обработанной поверхности (рис. 3 в,г).

Поэтому, показатель отклонения от прямолинейности в плоскости EFL с увеличением скорости вращения шпинделя выше $n=900$ об/мин для встречного фрезерования значительно меньше, чем для попутного.

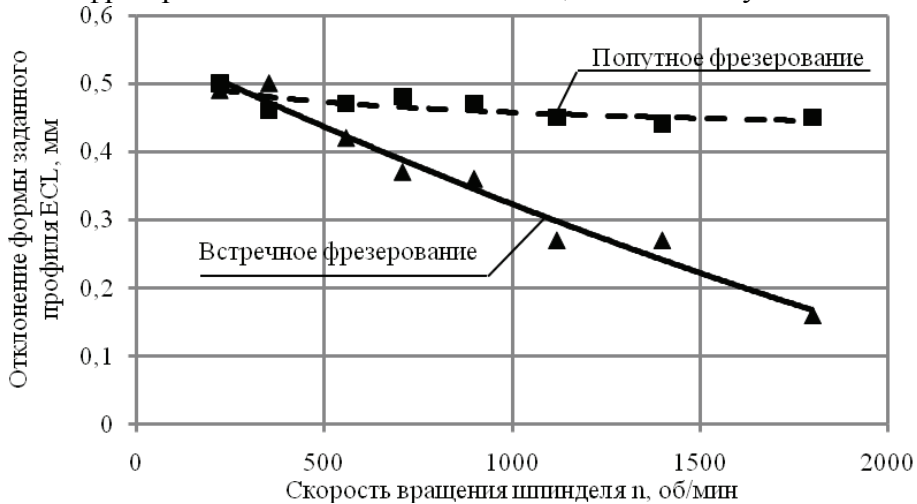


Рис. 7 Влияние направления фрезерования (встречное, попутное) на величину отклонение формы заданного профиля ECL

Отклонение формы заданного профиля ECL реального рельефа обработанной поверхности от его номинального уровня (рис. 7) для встречного фрезерования значительно ниже, чем для попутного. Это связано в первую очередь с эффективностью удаления припуска.

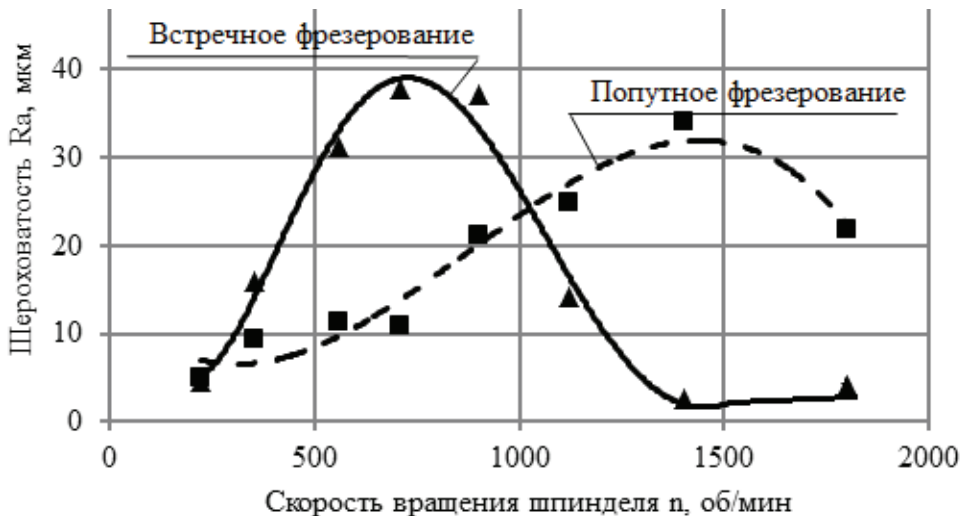


Рис. 8 Влияние направления фрезерования (встречное, попутное) на величину параметра шероховатости Ra

Сравнение значений параметра шероховатости Ra (рис. 8) для различных условий фрезерования показывает, что в зоне интенсивных регенеративных колебаний при встречном фрезеровании шероховатость выше, чем при попутном. Это связано с тем, что амплитуда регенеративных колебаний при встречном фрезеровании выше, чем при попутном до двух раз и более [2]. С увеличением скорости вращения шпинделя процесс обработки при встречном фрезеровании раньше выходит из зоны регенеративных колебаний и поэтому параметр шероховатости Ra обработанной поверхности при встречном фрезеровании при более высоких скоростях ниже, чем для попутного.

Выводы:

1. Закономерности удаления припуска, формирование точности и шероховатости обработанной поверхности при концевом фрезеровании тонкостенных деталей существенно отличается от обработки массивных деталей. Эти отличия обусловлены недостаточной жесткостью тонкостенных деталей, приводящие к ее упругимотжатиям и появлению вынужденных и автоколебаний.
2. Рассмотрена методология экспериментального измерения условий срезания припуска и формирования параметров качества обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании. Применение современных датчиков перемещений позволяет с высокой точностью определять особенности срезания припуска, формирование рельефа обработанной поверхности и параметры колебаний детали при обработке.
3. Результаты исследований показывают, что эффективность удаления припуска при встречном фрезеровании значительно выше, чем при попутном и с увеличением скорости вращения шпинделя до $n=1800$ об/мин достигает более 90% от теоретической производительности (т.е. фрезерование абсолютно жесткой детали). При попутном фрезеровании в аналогичных условиях эффективность снятия припуска достигает 54%.
4. Параметры отклонения от прямолинейности в плоскости EFL и шероховатости Ra обработанной поверхности в первую очередь связаны с появлением регенеративных колебаний, причем скоростные зоны их возникновения для встречного и попутного фрезерования различны. При встречном фрезеровании автоколебания возникают в диапазоне от $n=560$ об/мин до $n=1120$ об/мин, а при попутном от $n=710$ об/мин до $n=1400$ об/мин. Поэтому с увеличением скорости резания показатели качества для встречного фрезерования улучшаются и становятся значительно выше, чем для попутного.

5. Отклонение формы заданного профиля ECL для встречного фрезерования значительно меньше, чем для попутного и это в первую очередь определяется большей эффективностью удаления припуска при встречном фрезеровании.
6. В целом результаты исследования показали, что применение встречного фрезерования, при условии выхода из скоростной зоны возбуждения регенеративных колебаний, является более эффективным и может быть рекомендовано для промышленного применения на скоростном современном оборудовании.

Литература

1. Внуков Ю.Н. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 – вып. 79 – с.32-37.

2. Логоминов В.А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук / В.А. Логоминов. – Запорожье, 2013., 226с.

Надійшла до редакції 09.04.2014