

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОНЦЕВОГО ФИНИШНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ

Показаны экспериментальные исследования концевого фрезерования тонкостенных деталей. Рассмотрено влияние направления подачи на параметры колебаний детали и качество обработанной поверхности. Оценку колебаний проводили согласно разработанной авторами методике, которая позволяет полностью охарактеризовать поведение детали во время фрезерной обработки. Полученные данные показывают, что при определенных частотах вращения шпинделя выгодным является использование попутного или встречного фрезерования.

Ключевые слова: тонкостенная деталь, зона профилирования, колебания, резание, формообразование, упругая система.

Введение

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 шероховатость обработанной поверхности, 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.

Цель статьи – установление закономерностей влияния условий концевого финишного фрезерования на параметры колебаний тонкостенных деталей во время обработки.

В работе авторов [1] показано, что для изучения колебаний, возникающих в тонкостенной детали, необходимо одновременно учитывать как внешнюю силу – $P_{от}$ – отжима детали, вызывающую ее отклонение от положения равновесия, так и внутреннюю силу $P_{упр}$, стремящуюся вернуть деталь в положение равновесия. Причем, при начале движения детали появляются дополнительные внутренние силы: $P_{тр}$ – сила трения (демпфирования), зависящая от скорости движения, и сила инерции $P_{ин}$, зависящая от массы и ускорения движения детали. Так как движение детали является колебательным относительно положения ее равновесия, то в каждый момент времени действия этих сил могут быть разными по величине и противоположными по направлению.

Также стоит отметить, что при изучении колебаний (вибраций), возбуждаемых в детали или инструменте при резании, применение любых динамометров, имеющих собственную упругую систему с характери-

стиками жесткости, демпфирования и массой, вносит значительные погрешности при измерении возникающих отклонений и приводит к ошибочным общим результатам.

Поэтому при изучении вибраций оценку всех видов сил, действующих на деталь или инструмент необходимо проводить непосредственно по величине отклонения самой детали или инструмента. Отклонение, записанное во времени и является законом движения тела (детали или инструмента). Таким образом, путем осциллографирования отклонений тела во времени можно получить закон его движения и на основании этого закона изучать влияние всех видов сил, которые на него воздействуют.

Исходя из рассмотренных выше рассуждений, авторами разработан экспериментальный стенд [2] для исследования вибраций, возникающих в тонкостенной детали при концевом фрезеровании. На рис. 1 приведена схема измерения колебаний.

Оригинальностью данной схемы измерения является возможность раздельного рассмотрения влияния зоны обработки – и свойств упругой системы (УС) тонкостенной детали – 1 на особенности возбуждения в ней всех видов колебаний (вынужденных, автоколебаний и свободных затухающих).

Основным допущением в данной схеме является условие абсолютной жесткости инструмента. Такой подход позволяет независимо изменять условия фрезерования в зоне обработки (обрабатываемый материал, режимы резания, геометрию инструмента, условия его трения, нагрева и охлаждения), определяющих величину внешней возбуждающей силы $P_{от}$ и характеристики УС детали (жесткость, демпфирование, массу), определяющих величину внутренней силы $P_{упр}$, которая является реакцией детали на действие силы $P_{от}$.

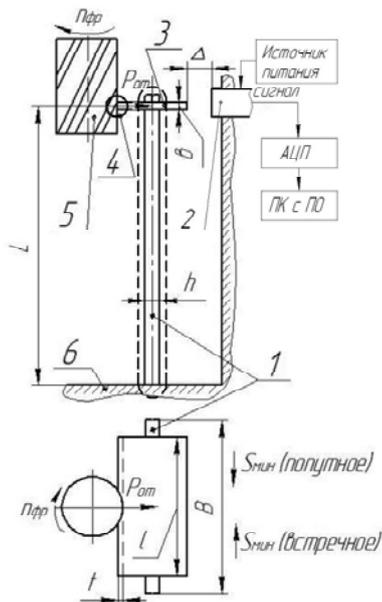


Рис. 1. Схема исследования колебаний тонкостенной детали при концевом фрезеровании

Закон движения (отклонения) детали определяется датчиком перемещения – 2, сигнал которого через АЦП записывается во времени и запоминается в ПК.

Оциллограмма колебательного движения тонкостенной детали в процессе обработки представляет собой регулярно повторяющиеся отклонения детали. Такой характер оциллограммы объясняется механикой процесса фрезерования, связанной с периодическим входом и выходом зубьев фрезы в деталь при срезании припуска. На основании анализа большого количества оциллограмм, записанных при различных условиях фрезерования, статических и динамических характеристиках УС детали, авторы предлагают использовать для анализа процесса фрезерования базовый (регулярно повторяющийся) фрагмент оциллограммы (БФО). Таким является участок оциллограммы между моментами начала контакта двух соседних зубьев фрезы. Также авторами определено 10 параметров на БФО отклонения тонкостенной детали, которые могут полностью характеризовать условия ее поведения при фрезерной обработке (рис. 2).

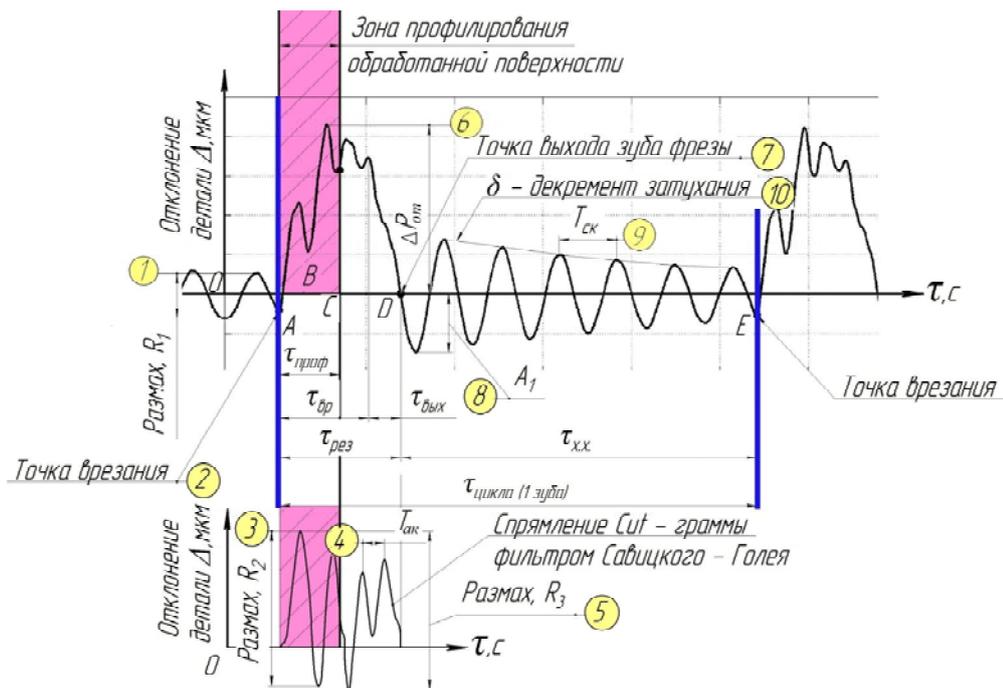


Рис. 2. Методика исследования колебаний по Cut-граммам отклонения детали (фрезерование встречное):

1 – размах свободных затухающих колебаний перед врезанием зуба фрезы в припуск – R_1 , 2 – точка врезания зуба фрезы в деталь, 3 – размах автоколебаний в зоне профилирования – R_2 , 4 – частота автоколебаний в процессе срезания припуска зубом фрезы $f_{ак} = \frac{1}{T_{ак}}$, 5 – размах автоколебаний в процессе резания – R_3 , 6 – максимальное отклонение детали в результате воздействия вынуждающей силы отжима $\Delta P_{от}$, 7 – точка выхода зуба фрезы, 8 – амплитуда первой волны свободных затухающих колебаний A_1 , 9 – частота свободных затухающих колебаний детали $f_{ск} = \frac{1}{T_{ск}}$, 10 – логарифмический декремент свободных затухающих колебаний детали δ

При рассмотрении колебаний в зоне резания удобно произвести спрямление данного участка фильтром Савицкого-Голея [4].

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].

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

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

б) **Инструмент** – концевая 3-х зубая фреза CANELA D20 Z3 со сменными многогранными неперетачиваемыми пластинками из твердого сплава АРКТ100305PDER JC8050 фирмы DiJet. В эксперименте устанавливался 1 режущий зуб. Вместо двух других зубьев устанавливались равные по весу свинцовые грузики, обеспечивающие балансировку фрезы. Геометрия режущего зуба: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 11^\circ$, $\lambda = -10^\circ$.

в) **Образец из обрабатываемого материала** размером 50Ч20Ч2 (Ст. 3кп ГОСТ 380-2005).

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

д) **Режимы фрезерования:**

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

С увеличением частоты вращения фрезы сокращается как время резания – $\tau_{рез}$, так и время холостого хода – $\tau_{х.х.}$ зуба фрезы. В этом случае, при выходе зуба фрезы из зоны резания деталь находится в возбужденном (колебательном) состоянии и до подхода очередного зуба не успевает успокоиться. Таким образом, очередной зуб врезается в деталь, которая совершает свободные затухающие колебания. В зависимости от того, в какой момент отклонения детали от положения равновесия происходит ее контакт с очередным зубом, будет определяться уровень ее отклонения от действия вынуждающей силы $P_{от}$.

При рассмотрении данной УС тонкостенной детали увеличение размаха свободных затухающих колебаний перед врезанием зуба фрезы в деталь начинается с $n = 710$ об/мин и далее стремительно увеличивается, достигая своих максимальных значений при $n = 1800$ об/мин. Характер роста параметра R_1 с увеличением скорости схож как при попутном, так и при встречном фрезеровании. Однако на высоких скоростях ($n = 1800$ об/мин) наблюдали существенную разницу при изменении направления подачи. Так, при встречном фрезеровании максимальное значение параметра R_1 составило 201 мкм, в то время как для попутного это же значение равнялось 124,5 мкм (рис. 3).

Итак, полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличении скорости вращения шпинделя существенно увеличивается и размах свободных затухающих колебаний перед врезанием зуба фрезы в деталь. И на высоких скоростях в условиях финишного фрезерования может достигать до 40 % припуска, что в значительной мере может способствовать ухудшению качества и размерной точности обработки. При таких условиях обработки необходимо обеспечивать минимальный разброс точки врезания путем точного подбора частоты вращения шпинделя.

Часть поверхности резания, оставшаяся от предыдущего прохода зуба, формирует рельеф обработанной поверхности и называется **участком профилирова-**

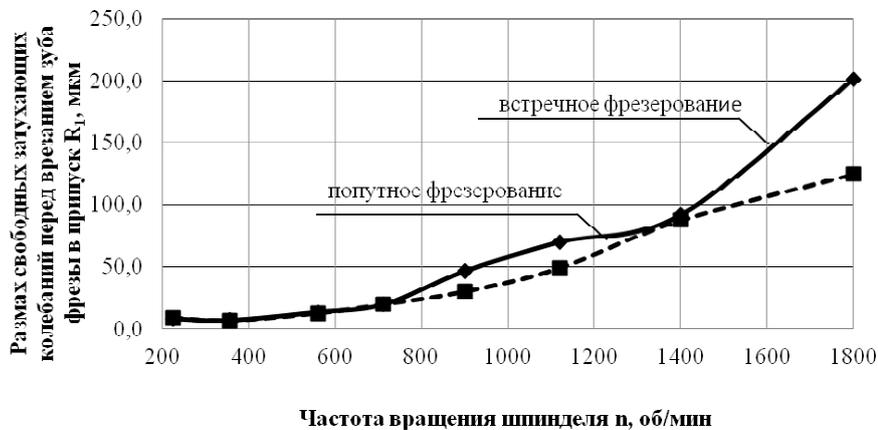


Рис. 3. Размах свободных затухающих колебаний перед врезанием зуба фрезы в припуск R_1 при различных направлениях подачи

ния рельефа (или зоной профилирования). Уровень колебаний на данном участке характеризует качество обработанной поверхности. На рис. 4 можно наблюдать скоростные диапазоны появления регенеративных автоколебаний. При встречном фрезеровании вырождение автоколебаний наступает при меньших частотах вращения шпинделя по сравнению с попутным. Также размах автоколебаний в зоне профилирования несколько выше (на 31 %) при встречном фрезеровании. Это является одними из характерных отличий попутного и встречного фрезерования.

При резании, когда зуб фрезы находится в зацеплении с припуском, частота УС тонкостенной детали становится выше ЧСК детали. Также частота автоколебаний является параметром, который определяет скорость резания, на которой произойдет вырождение автоколебаний. При уменьшении времени резания рано или поздно наступит такое его значение, когда системе будет недостаточно времени для совершения автоколебания, другими словами, период резания станет меньше периода колебаний. Однако, как показывают исследования, частота автоколебаний уменьшается при увеличении частоты вращения шпинделя (рис. 5), то есть система подстраивается под изменение условий резания. Также стоит отметить, что частота автоколебаний при попутном фрезеровании выше (в среднем на 30 %), чем при встречном. Именно поэтому при встречном фрезеровании вырождение автоколебаний происходит на более низкой скорости резания.

Параметр размаха автоколебаний в процессе резания характеризует воздействие процесса резания на износ режущего инструмента, шпиндельных узлов станка, уровень шума и т.д. На рис. 6 показан график изменения размаха автоколебаний в зависимости от скорости. В целом, сохраняются зависимости, полученные при измерении размаха автоколебаний в зоне профилирования, однако величина максимальных значений для попутного фрезерования более чем в 2 раза ниже по сравнению с встречным. Такие результаты показывают преимущество попутного фрезерования перед встречным в условиях работы в скоростном диапазоне появления регенеративных автоколебаний.

Максимальное отклонение детали в результате воздействия вынуждающей силы отжима показывает реакцию УС тонкостенной детали на возбуждение резанием под действием всех видов сил, которые участвуют в этом процессе (рис. 7). Максимальное отклонение детали существенно влияет на размерную точность обработки, так как тонкостенные детали под действием вынуждающей силы склонны к большим упругим отжатам. В ходе проведения исследований максимальное отклонение детали в процессе резания как при встречном, так и при попутном фрезеровании были близки и находились в диапазоне 400–510 мкм. Существенное увеличение отклонения (до 656 мкм) наблюдали только при встречном фрезеровании на максимальной исследуемой скорости резания ($n = 1800$ об/мин).

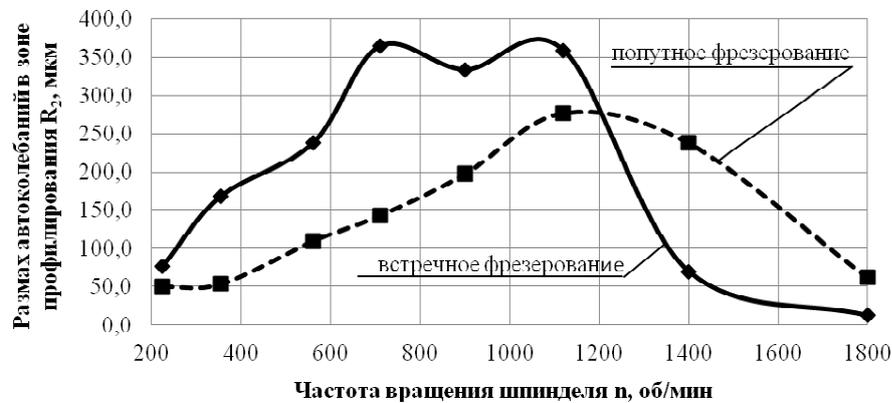


Рис. 4. Размах автоколебаний в зоне профилирования R₂



Рис. 5. Частота автоколебаний в процессе резания

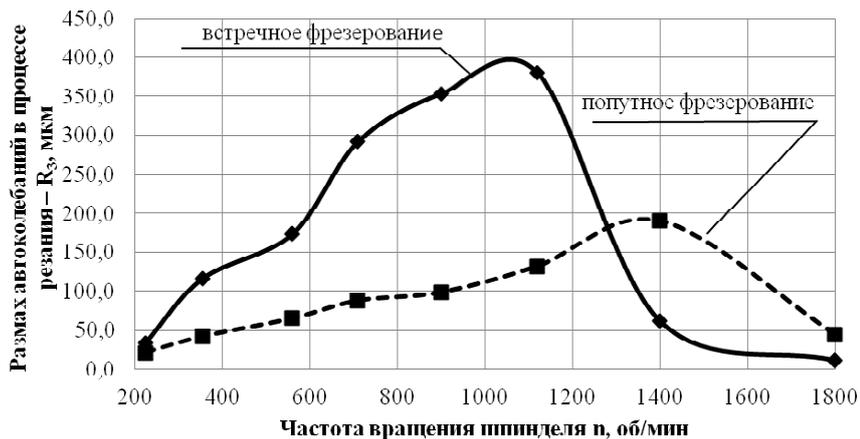


Рис. 6. Размах автоколебаний в процессе резания

Хотя существенного отличия между параметром $\Delta P_{от}$ для встречного и попутного фрезерования не наблюдали, разница в эффективности обработки существенная. Это связано с тем, что зона профилирования при встречном фрезеровании находится в начале длины контакта зуба фрезы с заготовкой, а при попутном – в конце. Следовательно, при попутном фрезеровании формирование профиля поверхности происходит уже тогда, когда заготовка существенно отклонилась от положения равновесия, что способствует ухудшению эффективности обработки.

Амплитуда первой волны свободных затухающих колебаний характеризует возбуждение УС тонкостенной детали процессом резания. Низкое значение данного параметра способствует быстрейшему успокоению системы до входа следующего зуба. С увеличением частоты вращения шпинделя увеличивается параметр A_1 (рис. 8). Изменение данного параметра определяется условиями контакта фрезы с заготовкой при резании, которые в основном зависят от характеристик системы, а также положением точки врезания

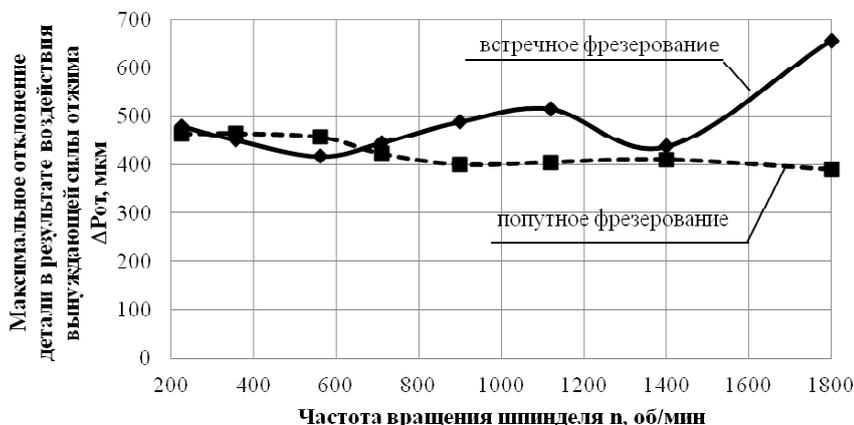


Рис. 7. Максимальное отклонение детали в результате воздействия вынуждающей силы отжима



Рис. 8. Амплитуда первой волны свободных затухающих колебаний

и требует специального рассмотрения. Результаты исследований показали, что для данной УС тонкостенной детали при встречном фрезеровании амплитуда первой волны свободных затухающих колебаний на 25 % и выше, чем при попутном, особенно на максимальных исследуемых скоростях.

Сравнение значений параметра шероховатости Ra (рис. 9) для различных условий фрезерования показывает, что в зоне интенсивных регенеративных колебаний при встречном фрезеровании шероховатость выше, чем при попутном. Это связано с тем, что размах регенеративных автоколебаний в зоне профилирования 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.

Полученные силы связи при попутном и встречном фрезеровании свидетельствует об эффективности применения разработанной методики исследования колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей. А также подтверждает тот факт, что именно в зоне профилирования происходит формообразование обработанной поверхности и этот маленький фрагмент, по сравнению со всем процессом обработки, является ключевым при решении вопросов повышения качества и точности концевого фрезерования.

Выводы

1. Разработанная методика оценки колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей позволяет характеризовать условия ее поведения при обработке

2. В определенном скоростном диапазоне наблюдалось появление регенеративных автоколебаний. Преимущественным для работы в таких условиях является попутное фрезерование, так как размах автоколебаний более чем в два раза ниже по сравнению с встречным.

Однако вырождение автоколебаний при встречном фрезеровании наступает на более низких скоростях, поэтому существует небольшой скоростной диапазон, где при встречном фрезеровании колебаний уже не будет, а при попутном они еще наблюдаются.

3. Частота автоколебаний при встречном фрезеровании в среднем на 30 % ниже, чем при попутном. Это и является причиной вырождения автоколебаний при встречном фрезеровании на более низких скоростях резания, по сравнению с попутным.

4. В ходе проведения исследований максимальное отклонение детали в процессе резания как при встречном, так и при попутном фрезеровании были близки и находились в диапазоне 400–510 мкм.

5. Результаты исследований показали, что для данной УС тонкостенной детали при встречном фрезеровании амплитуда первой волны свободных затухающих колебаний на 25 % и выше чем при попутном, особенно на максимальных исследуемых скоростях.

Полученные силы связи при попутном и встречном фрезеровании для значений размаха автоколебаний в зоне профилирования и параметра шероховатости обработанной поверхности Ra свидетельствует об эффективности применения разработанной методики исследования колебаний при фрезеровании тонкостенных деталей. А также подтверждает тот факт, что именно в зоне профилирования происходит формообразование обработанной поверхности.

Список литературы

1. Внуков Ю. Н. Устройство для исследования автоколебаний при токарной обработке / Внуков Ю. Н. // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві : зб. наук.праць – Вип. 2(7). – О. : Наука і техніка, 2014. – С. 38–48.
2. Логоминов В. А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей : дис. ... канд. техн. наук. : 05.03.01. / Логоминов Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с.

Одержано 16.04.2015

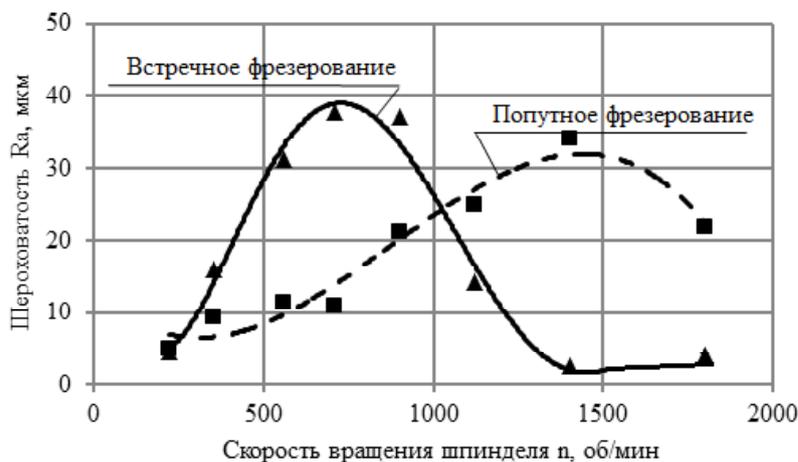


Рис. 9. Влияние направления фрезерования (встречное, попутное) на величину параметра шероховатости Ra

Дядя С.І., Козлова О.Б., Гермашев А.І., Сердюк А.А. Вплив умов кінцевого фінішного фрезерування на параметри коливань тонкостінної деталі

Показані експериментальні дослідження кінцевого фрезерування тонкостінних деталей. Розглянутий вплив напрямку подачі на параметри коливань деталі і якість обробленої поверхні. Оцінку коливань проводили згідно з розробленою авторами методикою, яка дозволяє повністю охарактеризувати поведінку деталі під час фрезерної обробки. Отримані дані показують, що при певних частотах обертання шпинделя вигідним є використання попутне або зустрічного фрезерування.

Ключові слова: тонкостінна деталь, зона профілізації, коливання, різання, формоутворення, пружна система.

Diadia S., Kozlova Ye., Germashev A., Serduk A. Influence of conditions of the finish end-milling on the oscillation parameters thin-walled parts

The experimental study of the end milling of thin-walled parts is shown. The effect of feed direction on the parameters of the oscillation parts and surface quality is studied. The evaluation was performed according to the oscillation method developed by the authors, which allows fully characterize the behavior of the items during the milling. The data show that at certain frequencies spindle advantageous is the use of climb or conventional milling.

Key words: thin-walled parts, the area of profiling, vibrations, cutting, shaping, resilient system.
