

ния, показали, что уже при  $\frac{c_0}{c} < 0,4$  вблизи наружной поверхности зоны резания нормальные напряжения становятся растягивающими.

Наличие растягивающих или недостаточно высоких сжимающих напряжений у наружной поверхности зоны резания приводит к тому, что трещины и другие дефекты, неизбежно возникающие при больших пластических сдвигах, на этом участке плоскости скалывания не заживают, что ускоряет отделение элемента. Поэтому смещение точки приложения силы  $N_p$  к режущей кромке влечет за собой уменьшение показателя сплошности. Это подтверждается хорошей согласованностью данных таблицы с изменениями  $k$ , приведенными на рис.2 (с учетом сделанных оговорок о зависимости координаты  $\frac{c_0}{c}$  центра давления от скорости резания).

С.И. Тахман, Ю.А. Розенберг, В.К. Волк

#### УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ОСНОВЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СИЛ РЕЗАНИЯ ОТ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ

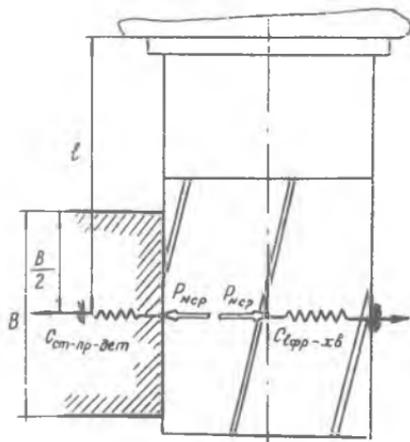
Отклонение замыкающих звеньев размерной цепи технологической системы СПИД друг от друга в условиях контурного фрезерования концевыми фрезами на 95-98% определяется упругими отжатыми под действием сил резания [1]. Поэтому вопросы точности контурного фрезерования и управления процессом, когда в качестве критерия используется точность, решаются с помощью модели упругого взаимодействия концевой фрезы и заготовки в направлении отсчета точности в этом виде обработки, т.е. по нормали к обрабатываемому контуру (рис.1). Для решения этих задач необходимо знать величину и точку приложения силы отжима фрезы по нормали к контуру  $P_N$ , закономерности влияния факторов процесса резания на характеристики этой технологической составляющей силы и податливость технологической системы на уровне приложения нагрузки. Надежные функциональные связи любых составляющих сил на фрезе с условиями обработки дают структурные уравнения с раздельным учетом сил, действующих на передних и задних поверхностях инструмента [2], [3]. Упругая податливость технологической системы "Деталь-приспособление-фрезерный станок с ПУ - узел крепления хвостовика фрезы - концевая фреза" на любом уровне приложения нагрузки может быть рассчитана по упрощенной схеме линейного распределения отжатий вдоль оси фрезы. При расчете по средней силе отжима можно считать, что точка приложения нагрузки располагается посередине ширины фрезерования.

Средняя сила отжима  $P_{Ncp}$  концевой фрезы определяется по уравнению

$$P_{Ncp} = \frac{Bz}{2\pi} \left\{ \frac{S_z}{2} \left[ C_{nn} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \mp U_{nn} \sin^2 \theta \right] + C_{zn} (1 - \cos \theta) \mp U_{zn} \sin \theta \right\}, (I)$$

где

$B$  - ширина фрезерования, мм;  $z$  - число зубьев фрезы;  $S_z$  - подача на зуб, мм/зуб;  $\theta = \arccos \left( 1 - \frac{t}{R_{фр}} \right)$  - угол контакта фрезы с заготовкой;  $t$  - глубина фрезерования, мм;  $R_{фр}$  - радиус фрезы, мм;  $C_{пн}$ ,  $C_{zn}$  - удельные силы на передней и задней поверхностях зуба фрезы в направлении скорости резания кгс/мм<sup>2</sup> и кгс/мм [3];  $U_{пн}$ ,  $U_{zn}$  - тоже по нормали к скорости резания, кгс/мм<sup>2</sup> и кгс/мм [3].



Р и с.1. Схема упругого взаимодействия концевой фрезы и заготовки:  $B$  - ширина фрезерования;  $C_{ст-пр-дет}$  - упругая податливость системы "станок-приспособление-деталь";  $C_{ср-хв}$  - упругая податливость системы "крепление хвостовика фрезы-концевая фреза";  $P_{Ncp}$  - средняя сила отжима фрезы

Положительная сила отжимает фрезу от обработанной поверхности. Верхние знаки в уравнении относятся к встречному, нижние - к попутному фрезерованию. Расчетная модель упругого взаимодействия элементов системы СПИД при контурном фрезеровании применима не только для точностных расчетов и анализа алгоритмов управления процессом по точности, но и для определения параметров инструмента и условий его работы, наиболее благоприятных для повышения точности в принятом способе управления процессом. Приведем некоторые способы реализации подобных расчетов.

### 1. Расчет погрешности обработки посередине ширины фрезерования.

Отжим концевой фрезы под действием сил резания осуществляется до тех пор, пока технологическая система, податливость которой  $\frac{1}{C_{зср}}$  не ока-

жется в новом состоянии равновесия. Система сил в состоянии равновесия включает в себя силу упругости, пропорциональную величине отжима  $y$  и направленную в сторону, противоположную отжиму. Кроме того, за счет отжима фрезы от положения настройки на эту величину изменятся глубина фрезерования:

$$\frac{Bz}{2\pi} \left\{ \frac{S_z}{2} [C_{nn}(\theta' - \sin \theta' \cos \theta) \mp U_{nn} \sin^2 \theta] + C_{3n}(1 - \cos \theta') \mp U_{3n} \sin \theta' \right\} - C_{zcp} y = 0, \quad (2)$$

где

$$\theta' = \arccos \left( 1 - \frac{t-y}{R_{\text{фр}}} \right) \quad (3)$$

В уравнение (2) отжим  $y$  входит линейно и под тригонометрическими функциями через уравнение (3). Поэтому расчет отжима  $y$  по этим уравнениям может быть осуществлен на ЭВМ в итерационном цикле с заданной степенью точности, что позволяет оценить достигаемую точность обработки на стадии подготовки программы.

2. Коррекция управляющей программы по средним силам отжима фрезы. Компенсация отжима фрезы изменением настроечного размера фрезы относительно заготовки позволяет на фрезерных станках с ЧПУ достигнуть заданной точности на принятом уровне производительности. Наиболее эффективно такую компенсацию производить расчетным путем одновременно с подготовкой управляющих программ. Этим резко снижается трудоемкость доводки программ.

Величина расчетной коррекции  $y_k$  соответствует отжиму фрезы в заданных номинальных условиях обработки, когда сила отжима рассчитана по уравнению (1)

$$y_k = \frac{Bz}{C_{zcp} 2\pi} \left\{ \frac{S_z}{2} [C_{nn}(\theta - \sin \theta \cos \theta) \mp U_{nn} \sin^2 \theta] + C_{3n}(1 - \cos \theta) \mp U_{3n} \sin \theta \right\} \quad (4)$$

Сложность расчетной коррекции управляющих программ - в переменности условий обработки на различных участках контура детали, что требует создания системы автоматического расчета программ с коррекцией с помощью ЭВМ. Реализация расчетной коррекции программ контурного фрезерования на станках с ЧПУ позволила снизить трудоемкость подготовки управляющих программ до однократного расчета и записи, значительно уменьшить местные искажения формы деталей на участках резких изменений нагрузки и снизить машинное время обработки на 30-50%.

3. Стабилизация погрешности обработки за счет режима. Если сохранять постоянную силу отжима фрезы во всех точках контура детали, то погрешность обработки также останется примерно одинаковой по всему контуру. Различие в величинах погрешности на разных участках де-

тали может наблюдаться потому, что по уравнениям (2) и (3) при разных соотношениях глубины фрезерования и подачи на зуб система сил уравнивается при несколько отличающихся значениях величины отжима  $\gamma$ . Естественно, что таким образом назначенный режим обработки резко снижает разброс погрешностей контура детали. При этом постоянное значение погрешности может быть скорректировано в программе или системой корректировки с пульта управления станка.

Постоянство силы отжима обычно достигается изменением скорости перемещения фрезы вдоль контура, т.е. регулированием подачи. Величина подачи на зуб  $S_{zc}$ , обеспечивающая заданную силу ( $P_{ncp}$ ) в условиях переменного номинального припуска на обработку, определяется по формуле

$$S_{zc} = \frac{2}{C_{nn}(\theta - \sin\theta \cos\theta) \mp U_{nn} \sin^2\theta} \left\{ \frac{2\pi [P_{ncp}]}{Bz} - C_{3n}(1 - \cos\theta) \pm U_{3n} \sin\theta \right\} \quad (5)$$

Стабилизация силы отжима за счет подачи - прием, ограниченный рядом факторов. К ним относятся: необходимый уровень производительности обработки, ограничивающий наименьшую подачу и определяющий нижний уровень задания силы отжима ( $P_{ncp})_{min}$  технологически допустимая подача по шероховатости и качеству обработанной поверхности, ограничивающая наибольшую подачу; прочность фрезы и механизмов подачи станка, определяющий верхний уровень задания силы отжима ( $P_{ncp})_{max}$  с учетом действия и силы подачи. Назначение подачи по ограничениям приводит к нарушениям стабилизации погрешности и возрастанию разброса погрешностей детали. Этот алгоритм определения подачи может быть реализован в блоке расчета режимов обработки автоматической системы технологического проектирования для станков с ЧПУ.

4. Ограничение критерия износа фрезы при стабилизации сил системой адаптивного управления. При поддержании какой-либо технологической составляющей на заданном уровне с помощью системы адаптивного управления износ фрезы по задним поверхностям может оказывать сложное влияние на условия работы станка. Если с целью повышения точности стабилизируется сила отжима, то увеличение фаски износа при сохранении остальных параметров режима приводит к увеличению подачи на зуб при встречном и к уменьшению - при попутном фрезеровании. При этом другие технологические составляющие сил резания по-иному зависят от величины износа, нежели стабилизируемая сила. Поэтому ограничение возможности стабилизации по прочностным факторам фрезы и станка необходимо оценивать по равнодействующей сил на фрезе. Наибольшее допустимое значение фаски износа по задней поверх-

ности (критерий износа фрезы) должно выводить величину равнодействующей на уровень ограничения по прочности  $\rho_{max}$  при самой малой подаче на зуб, обрабатываемой системой управления.

Величина критерия износа может быть рассчитана по уравнению:

$$h_{3к} = \frac{2\pi}{8z\sigma_{0,2}} \frac{\rho_{max} - \sqrt{(\rho'_{N s_2 = 0,03})^2 + (\rho'_{S s_2 = 0,03})^2}}{\sqrt{2(1 - \cos \theta)(\mu_{сух}^2 + 2\mu_{сух} \sin \theta + 1)}}, \quad (6)$$

$\rho'_N$  и  $\rho'_S$  - сила отжима и сила подачи на фрезе, рассчитанные для острого инструмента на принятой наименьшей подаче  $s_2 = 0,03$  мм/зуб, обрабатываемой системой управления, кгс;  $\sigma_{0,2}$  - предел текучести недеформированного обрабатываемого материала при растяжении, кгс/мм<sup>2</sup>;  $\mu_{сух}$  - коэффициент сухого трения в паре обрабатываемый материал - инструментальный материал (при обработке сталей  $\mu_{сух} \approx 0,23$ ).

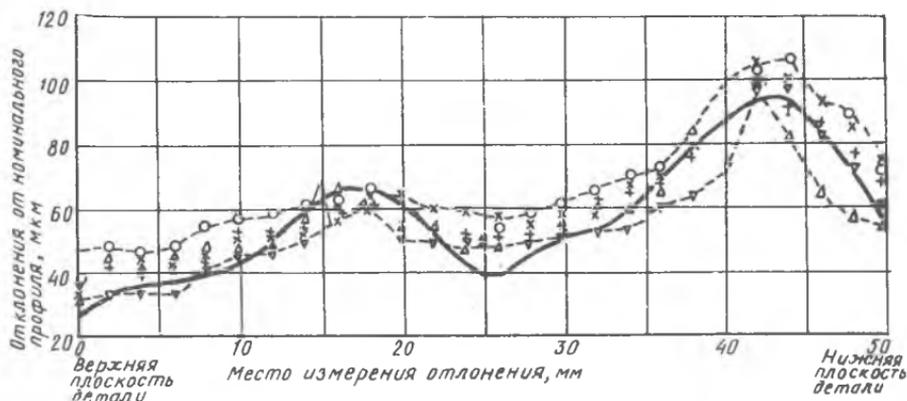
Уравнение (6) выведено по гипотезе об условиях взаимодействия фаски износа с обрабатываемым материалом в виде сухого трения с нормальным напряжением, не превышающим предела текучести материала [3].

Результаты расчетов показывают, что при контурном фрезеровании на станках с ЧПУ критерий износа концевых фрез должны быть ниже, чем обычно рекомендуются в нормативах. Так при встречном фрезеровании детали из серого чугуна твердостью НВ-200 кгс/мм<sup>2</sup>, шириной 35 мм, пятизубой фрезой расчетный критерий износа фрезы при поддержании средней силы отжима на нулевом уровне составляет 0,3 мм.

**5. Формирование боковой поверхности детали.** Концевая фреза с винтовым зубом профилирует обрабатываемую поверхность точкой режущей кромки, которая смещается вдоль оси фрезы при ее вращении. Неравномерность нагрузки, отжимающей фрезу, характерная для фрезерования, изменяет не только величину действующей мгновенной силы, но и положение центра давления распределенной по сложному закону по ширине фрезерования нагрузки. Это изменение величины изгибающего фрезеру момента переносится на обработанную поверхность в точке профилирования. Структурные зависимости позволяют через те же константы - удельные силы резания - рассчитывать мгновенные силы отжима. Учитывая переменную жесткость концевой фрезы на различных вылетах, изменение мгновенных сил и смещение точки их приложения, можно оценить сложный профиль обработанной поверхности по высоте детали с выступами и впадинами, значительно отличающийся от формы образующей цилиндра фрезы.

На рис.2 показано сравнение расчетного профиля боковой стороны детали из стали 40Х высотой 50 мм, обработанной трехзубой быстроре-

жудей фрезой диаметром 20 мм в условиях встречного фрезерования



Р и с.2. Сравнение расчетного профиля боковой стороны детали с профилограммами обработанной поверхности: сталь 40Х, фрезерование стречное  $B=50$  мм; материал фрезы Р12, диаметр фрезы 20 мм,  $\omega = 40^\circ$ ,  $z = 3$ ,  $n = 200$  об/мин,  $S_z = 0,08$  мм/зуб,  $t = 3$ , — расчетный профиль; - - - границы разброса экспериментальных данных

при  $S_z = 0,08$  мм/зуб и  $t = 3$  мм, с профилограммой обработанной поверхности.

Совпадение расчетных данных с экспериментальными подтверждает надежность структурных зависимостей для определения сил резания и правильность математической модели силового взаимодействия элементов системы СПИЦ при контурном фрезеровании концевыми фрезами.

### Л и т е р а т у р а

1. Ратмиров В.А., Чурин И.Н., Шмутер С.Л. Повышение точности и производительности станков с программным управлением, М., "Машиностроение", 1970.
2. Розенберг А.М., Розенберг Ю.А., Тахман С.И. Исследование сил резания при работе цилиндрическими твердосплавными фрезами по черным металлам. Сб.: Фрезы. НИИМаш, М., 1968.

3. Т а х м а н С.И. Определение сил на передней и задней поверхностях инструмента. Сб.: Резание металлов и технологическая точность деталей в машиностроении, ч.1. Под ред. Ю.А. Розенберга, Курган, 1968.

Г.С. Железнов, В.А. Шевяков

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ НАРЕЗАНИИ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ С ВИНТОВЫМИ КАНАВКАМИ

В работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования крутящего момента при обработке метчиками с прямыми и винтовыми стружкоотводящими канавками.

Теоретическое исследование основано на разделении сил, действующих на метчики, по их физико-механической природе на две группы:

- 1) силы, действующие на передней поверхности, обусловленные процессом образования стружки;
- 2) силы, действующие на задней поверхности, обусловленные контактом инструмента с заготовкой по поверхности резания.

В соответствии с этим крутящий момент можно представить в виде суммы

$$M = M_n + M_z ,$$

где  $M_n$  и  $M_z$  - крутящие моменты, создаваемые силами приложенными соответственно на передней и задней поверхностях инструмента.

Для расчета первого слагаемого -  $M_n$  основывались на представлении процесса резания как деформации простого сдвига [1]. С целью использования приведенных в указанной работе формул для расчёта сил, действующих при косоугольном резании, проводились экспериментальные исследования процесса стружкообразования. Эти исследования, а также расчеты по формулам, имеющимся в работах [1], [2], [3], [4], показали что угол схода стружки при резбонарезании метчиками с винтовыми канавками приблизительно равен углу наклона канавок -  $\omega$  (в дальнейшем принимали эти углы равными).

Момент сил, действующих на передней поверхности зубьев метчика, определяется по формуле

$$M_n = K \tau F \ell ,$$

где  $\tau$  - среднее касательное напряжение в поверхности сдвига;

$F$  - суммарная площадь срезаемого слоя;  $\ell$  - расстояние от центра тяжести суммарного сечения срезаемого слоя до оси метчика;  $K$  - без-