

Повышение эффективности шлифования наружной звездочки кулачкового дифференциала

Ю.В. Петраков

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 03 September 2018 / Accepted: 08 October 2018

Аннотация. Представлена новая методика и прикладная программа для автоматизации программирования операции шлифования кулачков наружной звездочки дифференциала повышенного трения на шлифовальном станке с ЧПУ. Программа базируется на созданной цифровой модели процесса шлифования, которая позволяет выполнять моделирование и детерминировать главную характеристику процесса – скорость срезания припуска (MRR – Material Removal Rate). Полученный файл моделирования, содержащий массив данных силы резания с привязкой к полярному углу контура звездочки, с помощью другой, специально разработанной прикладной программы, используется для проектирования закона управления частотой вращения шпинделя детали, который обеспечивает определенную стабилизацию процесса резания. Моделирование шлифования с таким управлением показывает, что, при сохранении исходного диапазона изменения MRR процесса, возможно повышение производительности операции не менее чем в 1,5 раза.

Ключевые слова: звездочка кулачкового дифференциала, шлифовальный станок с ЧПУ, компьютерное моделирование

Вступление

Кулачковый дифференциал повышенного трения обладает существенными преимуществами по сравнению с дифференциалами других типов, которые заключаются в повышении проходимости автомобиля при перемещении по бездорожью [1]. Поэтому такие дифференциалы устанавливаются на грузовых автомобилях военного назначения (ГАЗ-66) и различного типа БМП. Дифференциал (рис.1) состоит из двух чашек 2 и 5, которые опираются на роликовые конические подшипники, вмонтированные в картер ведущего моста [2]. К правой чашке прикреплено зубчатое колесо 3, к левой – сепаратор, в котором просверлены два ряда радиальных отверстий, расположенных в шахматном порядке, по 12 штук в каждом ряду. В отверстия

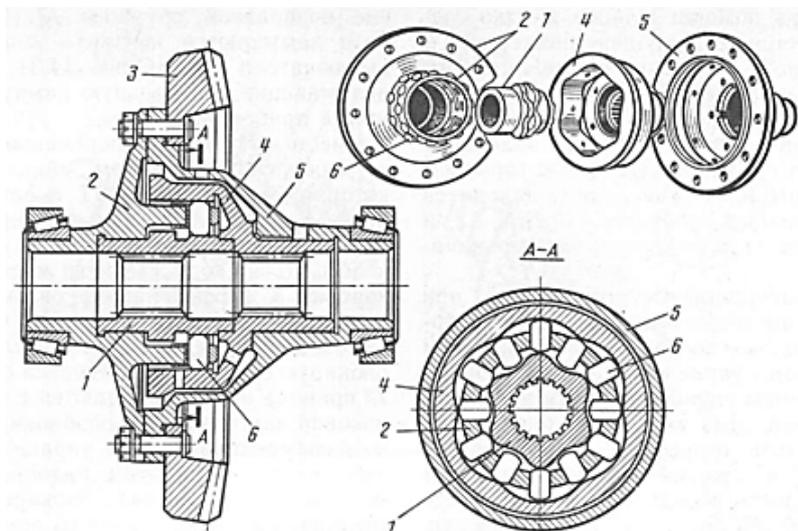


Рис. 1. Кулачковый дифференциал повышенного трения автомобиля ГАЗ-66

вставлены сухари 6, которые могут перемещаться, контактируя с внутренней 1 и внешней 4 звездочками, установленными между чашками 2 и 5. На внутренней поверхности звездочки равномерно расположены шесть выступов (кулачков), а на внешней поверхности внутренней звездочки 1 имеется два ряда кулачков, расположенных в шахматном порядке по шесть кулачков в каждом ряду. Все кулачки имеют профиль специальной конфигурации, очерченный сопряженными дугами окружностей, что обеспечивает уникальные свойства дифференциала.

Главным недостатком таких дифференциалов является их повышенный износ, в частности

рабочих поверхностей кулачков звездочки, что вызывает необходимость изготовления этих деталей непосредственно в ремонтных предприятиях Украины. Замена же дифференциала на другой тип приводит к резкому снижению проходимости в условиях бездорожья и утрате важных преимуществ.

Технологический процесс изготовления звездочки дифференциала состоит из нескольких операций, однако наибольшие трудности возникают на окончательной, финишной операции, которой является шлифование рабочих поверхностей кулачков. Для выполнения этой операции необходимо реализовать два основных условия: относительное движение формообразования заготовки и шлифовального круга и управление процессом срезания припуска. Такие условия можно обеспечить на современных шлифовальных станках с ЧПУ, которые снабжаются САМ-системами, позволяющими выполнять как программирование формообразующих движений, так и управление поперечной подачей в цикле шлифования, разделяя припуск на участки с назначением для каждого участка определенной величины подачи (рис.2).

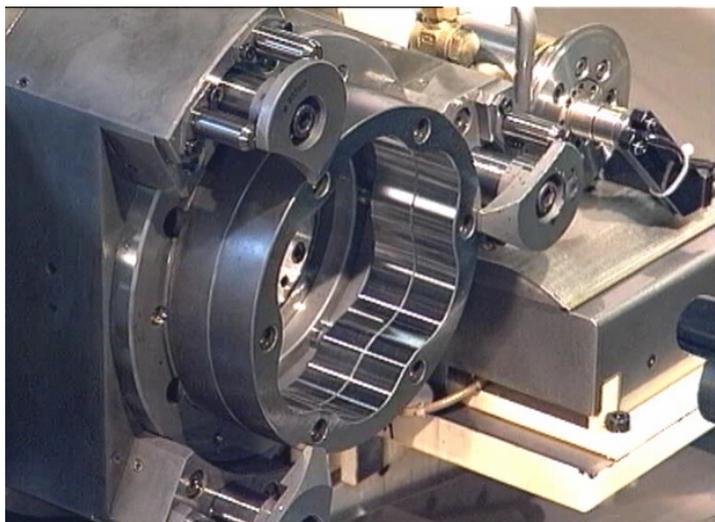


Рис. 2. Рабочая зона шлифовального CNC станка фирмы Studer

Однако, используемые САМ системы, например StuderPunch, хотя и обеспечивают возможность спроектировать управляющую программу для шлифования сложных поверхностей типа кулачков звездочки дифференциала, но не предлагают конкретных рекомендаций по выбору величин подач и точек переключения, необходимых для выполнения оптимального цикла шлифования [3, 4]. Кроме того, учитывая существенную нестационарность процесса резания из-за изменения дуги резания вдоль формообразующей траектории, желательно стабилизировать процесс по его главной характеристике – скорости срезания припуска (MRR – Material Removal Rate) за счет управления частотой вращения шпинделя детали [5]. Шлифовальный станок с ЧПУ принципиально способен выполнять такое регулирование, однако данные по управлению частотой вращения шпинделя заготовки для стабилизации процесса шлифования в известных САМ-системах вообще отсутствуют. Анализ показывает, что главной причиной такого подхода к проектированию управляющих программ, является отсутствие адекватных математических моделей процессов шлифования некруглых поверхностей. Имеющиеся модели расчета MRR характеристики основываются на аналитических зависимостях и не отражают процесса срезания припуска с некруглой поверхности. Для расчета силы резания при шлифовании в основном предлагается использовать модели, основанные на определении геометрической траектории режущих зерен, однако в этих моделях не учитываются особенности обработки некруглых поверхностей и, кроме того, они предполагают необходимость экспериментального определения трех (и более) эмпирических коэффициентов, что затрудняет их практическое применение [6, 7, 8].

Осознавая необходимость управления процессом с целью стабилизации его характеристик, также предлагаются решения, связанные с применением адаптивных систем, что всегда приводит к усложнению станка [9]. Все же в настоящее время следует считать наиболее эффективным метод управления по априорной информации с использованием цифровой модели процесса [10]. Поэтому проблема создания средств автоматизации проектирования управляющей программы с обеспечением стабилизации режима резания по главному критерию является актуальной.

Цель работы

Целью данного исследования является создание адекватной цифровой математической модели процесса шлифования кулачков звездочки дифференциала повышенного трения и разработки на ее основе САМ-системы автоматизации программирования шлифовальных станков с ЧПУ, что позволит стабилизировать процесс по критерию MRR и повысить его производительность при обеспечении требуемого качества.

Изложение основного материала

Для достижения цели была применена концепция решения аналогичных задач, разработанная на кафедре технологии машиностроения КПИ им. Игоря Сикорского, которая была успешно апробирована для различных видов механической обработки. Она состоит в последовательном выполнении трех основных этапов. На первом этапе создается цифровая геометрическая модель контура детали и заготовки с привязкой к системе координат, в которой будет реализована обработка. На втором этапе выполняется компьютерное моделирование обработки с использованием основной процедуры, позволяющей автоматически определять аналог скорости срезания припуска в функции координаты формообразования в течение всего цикла обработки. И, наконец, на третьем этапе с помощью полученного файла моделирования в специальной прикладной программе проектируется закон управления, стабилизирующий процесс резания по его главной характеристике MRR.

Разработка цифровой модели. Профиль кулачков наружной звездочки дифференциала, как правило, формируется дугами окружностей, например, как показано на рис.3, где изображена 1/12 часть всего профиля, образованного двумя сопряженными дугами радиусами R_1 и R_2 . Поскольку обработка выполняется в полярной системе координат (см. рис.2), то для создания цифровой модели необходимо найти зависимость $R = f(\phi)$. Зависимость определяется на двух диапазонах изменения полярного угла ϕ от 0 до $\angle EOB$ и от $\angle EOB$ до $\pi/6$. Величина $\angle EOB$ зависит от геометрических параметров профиля и определяется по формуле:

$$\angle EOB = \arcsin\left(\frac{R_1 \sin(\angle OO_1O_2)}{OB}\right), \quad (1)$$

где $\angle OO_1O_2 = 5\pi/6 - \angle O_1O_2O$, $\angle O_1O_2O = \arcsin\left(\frac{OO_1}{2(R_1 + R_2)}\right)$, $OO_1 = d/2 - R_1$, где d – максимальный внутренний диаметр звездочки, а $OB = \sqrt{(OO_1)^2 + R_1^2 - 2(OO_1)R_1 \cos(\angle OO_1B)}$.

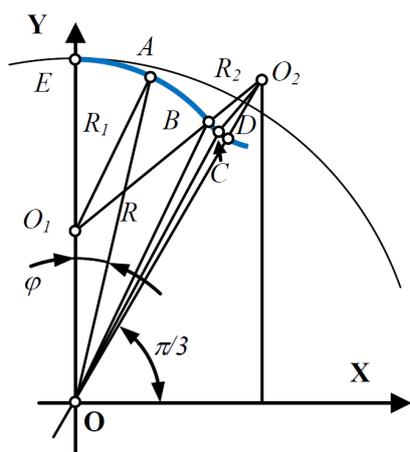


Рис. 3. К расчету геометрической модели

На первом диапазоне изменения полярного угла ϕ радиус R в функции этого угла может быть определен из $\triangle OO_1A$:

$$R = \sqrt{(OO_1)^2 + R_1^2 - 2(OO_1)R_1 \cos(\angle OO_1A)}, \quad (2)$$

где $\angle OO_1A = \pi - \phi - \angle O_1AO$, а $\angle O_1AO = \arcsin\frac{OO_1 \sin \phi}{R_1}$.

Аналогично, на втором диапазоне изменения полярного угла ϕ радиус R определяется из $\triangle OCO_2$:

$$R = \sqrt{R_2^2 + (OO_2)^2 - 2R_2(OO_2) \cos(\angle CO_2O)}, \quad (3)$$

где $OO_2 = \sqrt{(OO_1)^2 + (R_1 + R_2)^2 - 2(OO_1)(R_1 + R_2) \cos(\angle OO_1O_2)}$, а $\angle CO_2O$ может быть найден из $\triangle CO_2O$:

$$\angle CO_2O = \pi - \angle OCO_2 - \pi/6 + \phi = 5\pi/6 - \angle OCO_2 + \phi$$

$$\text{и } \angle OCO_2 = \arcsin\frac{OO_2 \sin(\pi/6 - \phi)}{R_2}.$$

Компьютерное моделирование. При моделировании необходимо обеспечить адекватную имитацию многопроходного процесса шлифования с постепенным удалением части припуска и превращением заготовки в деталь. Главной целью моделирования является определение условий процесса резания по всей траектории формообразования, которые характеризуются величиной дуги резания.

На рис.4, а линией 1 показан контур детали, а линией 2 – контур заготовки при эквидистантном расположении припуска. Центр шлифовального круга 3 перемещается (в обращенной схеме) по эквидистанте 4, а его периферия срезает припуск, образуя соответствующую дугу резания. Из схемы видно, что дуга резания существенно изменяется при движении шлифовального круга по эквидистанте и для ее определения необходимо в каждый момент времени рассчитывать координаты точек a начала и b конца дуги, которые расположены на шлифовальном круге. Дуга резания определяет главную характеристику процесса – MRR, которую в данном случае удобно детерминировать через аналог скорости срезания припуска [10]:

$$Q = 0.5(R_{шк} \varepsilon)^2, \quad (4)$$

где $R_{шк}$ – радиус шлифовального круга, ε – угол контакта круга и заготовки.

Как следует из формулы (4) эта характеристика имеет размерность $\text{мм}^2/\text{рад}$ и при умножении ее на скорость подачи по формообразующей траектории, которая в полярной системе координат имеет размерность $\text{рад}/\text{с}$, можно получить требуемую размерность скорости срезания припуска – $\text{мм}^3/\text{с}$. Таким образом:

$$MRR = Q\omega_{шд}, \quad (5)$$

где $\omega_{шд}$ – частота вращения шпинделя детали.

Из такой простой взаимосвязи следует, что если аналог Q определяется исключительно геометрическим взаимодействием контура заготовки со шлифовальным кругом, то MRR зависит также и от частоты вращения шпинделя детали. Следовательно, за счет управления последней можно влиять на характер изменения этой главной характеристики при движении по траектории формообразования, стабилизируя ее на заданном уровне. Таким образом, задача компьютерного моделирования процесса сводится к определению на каждом шаге координат точек начала и конца дуги резания.

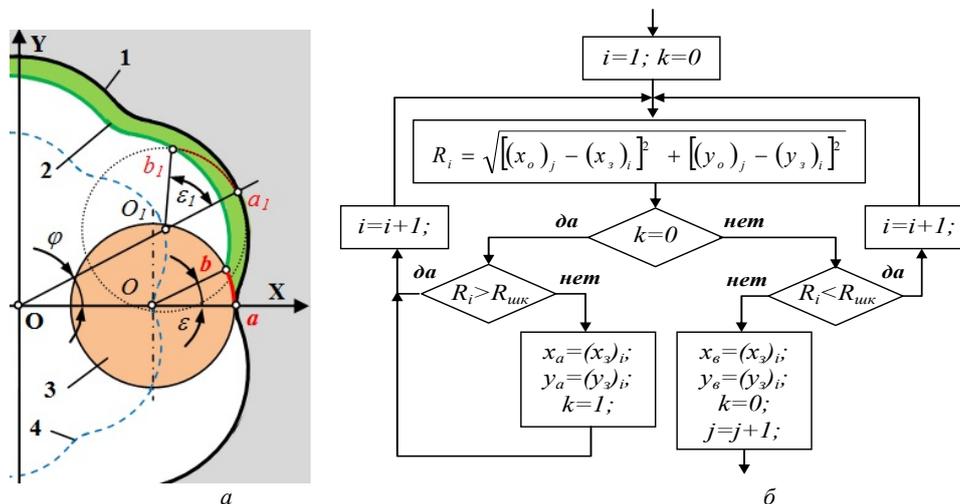


Рис. 4. Схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки (а) и алгоритм определения дуги резания (б)

Для этой цели была разработана специальная процедура, алгоритм которой представлен на рис.4, б. Процедура рассчитана на представление геометрического образа заготовки в виде цифрового массива, который предварительно сформирован вычислениями по формулам (1) – (3). Для каждого положения шлифовального круга (номер j на схеме) рассчитывается длина R_i для каждой точки массива контура заготовки (i – номер точки массива). Поскольку $k=0$, то алгоритм проверяет условие $R_i > R_{шк}$ и его невыполнение определяет точку начала дуги резания (координаты x_a, y_a). Теперь $k=1$ и аналогично функционирует правая часть алгоритма до определения координат точки конца дуги резания (координаты x_b, y_b). После этого функционирует специальная процедура, которая пересчитывает контур заготовки с учетом участка ab , образовавшегося вследствие удаления материала заготовки, что привело к соответствующему изменению ее контура на этом шаге моделирования и готовит действия алгоритма на следующем шаге (номер $j=j+1$). Операции повторяются, однако уже с измененным контуром заготовки.

Такой алгоритм составляет основу прикладной программы, интерфейс которой в состоянии моделирования показан на рис.5. Для начала функционирования программы загружаются исходные данные, содержащие геометрическую информацию о контуре звездочки. Затем можно выбрать режим резания, который моделируется – соответствующие кнопки интерфейса. Для формирования файла управления частотой вращения шпинделя детали станка с ЧПУ необходимо выбрать режим резания с постоянной частотой вращения, величина которой представлена в соответствующем окне. Затем загружается файл управления поперечной подачей, который был сформирован согласно указаниям, представленным в [10]. Разработанный в работе [10] алгоритм положен в основу прикладной программы, позволяющей в интерактивном режиме, на основании данных о технологической обрабатываемой системе и граничном алгоритме управления, спроектировать файл управления поперечной подачей, который может быть реализован на современном шлифовальном станке с ЧПУ, например, фирмы Studer. Спроектированный таким образом для целей моделирования файл содержит четыре точки переключения величины подачи.

При нажатии кнопки «Процесс» выполняется моделирование с анимацией процесса шлифования в графическом окне интерфейса и визуализацией результатов в окне виртуального осциллографа. Шлифовальный круг 1 осуществляет движение формообразование, а заготовка 2 – вращается вокруг оси. При этом шлифовальный круг, взаимодействуя с припуском 3 (увеличено в 100 раз), удаляет его благодаря движению поперечной подачи аналогично реальному процессу шлифования.

В окне виртуального осциллографа представляются осциллограммы следующих характеристик процесса: линия 4 – длина дуги резания (величина в $мм$ – по левой шкале), линия 5 – поперечная подача (величина в $мм/с$ – по левой шкале), линия 6 – частота вращения шпинделя (величина в $об/мин$ – по правой шкале), линия 7 –

окружная составляющая силы резания (величина в H – по правой шкале). Процесс представляется в функции угла поворота заготовки – нижняя шкала осциллографа. Можно наблюдать момент переключения величины подачи в соответствии с заданным законом управления (линия 5 при 1040° поворота заготовки).

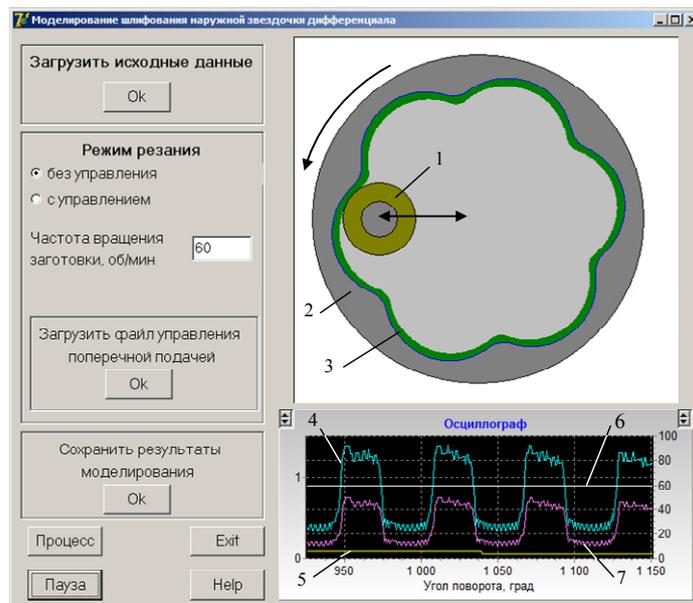


Рис. 5. Интерфейс прикладной программы моделирования

После окончания моделирования всего цикла шлифования в графическом окне появляется надпись со значением реального времени цикла (12,2с) и предоставляется возможность сохранить результаты моделирования в виде файла, который содержит величины окружной составляющей силы резания в функции угла поворота в формате *.txt. Окружная составляющая рассчитывается по известной зависимости [10]:

$$P_o = C_p (MRR)^\alpha, \quad (6)$$

где C_p , α - эмпирические коэффициент и показатель степени.

Проектирование закона управления. Поскольку моделирование выполняется по численным алгоритмам, зависимость окружной составляющей силы резания от угла поворота, хотя и отражает течение реального процесса шлифования, но не является достаточно гладкой для формирования управления частотой вращения шпинделя детали, с заявленной целью стабилизации процесса. Поэтому была создана дополнительная прикладная программа, выполняющая функции автоматического проектирования закона управления при заданных значениях желаемого уровня стабилизации силы резания и максимально допустимого ускорения шпинделя станка. Последнее ограничение особенно важно для возможности практической реализации управления на конкретном станке с ЧПУ. Этот параметр закона движения будет зависеть от мощности привода вращения шпинделя и рассчитывается по паспорту станка.

Алгоритм созданной прикладной программы состоит из двух основных процедур. Первая вычисляет массив $[\omega]_i$ частоты вращения шпинделя непосредственно по данным файла моделирования с шагом в один градус:

$$[\omega]_i = 60 (P_3 / [P_o]_i)^{1/\alpha}, \quad (7)$$

где P_3 – заданная величина желаемой силы резания.

Далее, вторая процедура выполняет сглаживание полученного массива путем повторения вычислений массивов данных по известным зависимостям:

$$\begin{aligned} 1) \omega l_i &= (\omega_{i-2} + 2\omega_{i-1} + 3\omega_i + 2\omega_{i+1} + \omega_{i+2}) / 9, \\ 2) \omega_i &= (\omega l_{i-2} + 2\omega l_{i-1} + 3\omega l_i + 2\omega l_{i+1} + \omega l_{i+2}) / 9. \end{aligned} \quad (8)$$

Вычислительный процесс на каждом цикле проверяется на соответствие максимально допустимому ускорению $(\omega\varepsilon)_{\max}$, которое оценивается в массиве, сформированном в цикле по следующей процедуре. Для каждого шага по массиву данных рассчитывается промежуток времени:

$$\delta t_i = 2\delta\phi / (\omega_{i-1} + \omega_{i+1}),$$

а затем ускорение:

$$\omega\varepsilon_i = (\omega_{i-1} + \omega_{i+1}) / \delta t_i.$$

При выполнении условия, когда для всех значений массива ускорение не превышает допустимую величину, вычислительный процесс прекращается, а результаты выводятся на экран интерфейса (рис.6) и могут быть сохранены в файле управления.

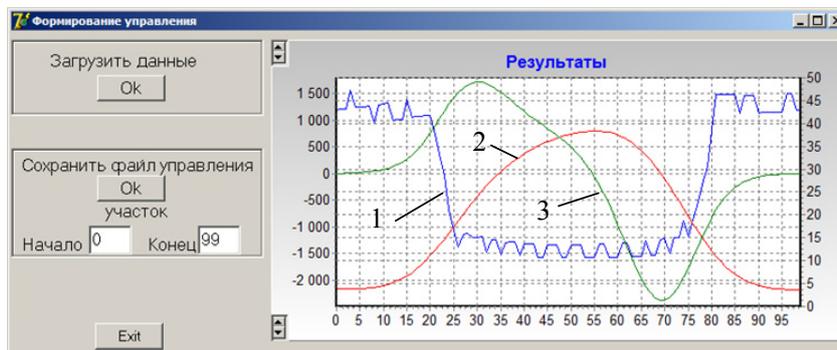


Рис. 6. Интерфейс прикладной программы:

1 – исходные данные моделирования, 2 – сформированный закон управления, 3 – угловое ускорение

Сравнение первоначально рассчитанного массива данных частоты вращения шпинделя по формуле (7) с окончательно спроектированным управлением с учетом ограничения по ускорению не позволяет надеяться на полную стабилизацию процесса резания. Поэтому важно перед практическим применением выполнить моделирование с управлением частотой вращения шпинделя детали по спроектированному закону, чтобы скорректировать управление поперечной подачей. Созданная для моделирования прикладная программа позволяет провести такие эксперименты. На рис.7 представлен виртуальный осциллограф с интерфейса прикладной программы при моделировании процесса с управлением согласно спроектированному выше закону и при увеличении значений поперечной подачи цикла обработки в 1,5 раза.

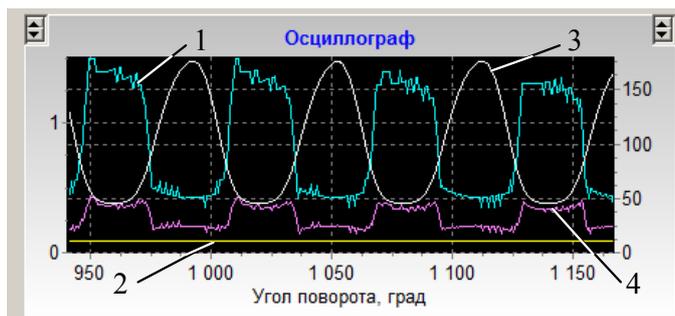


Рис. 7. Результаты моделирования процесса с управлением частотой вращения шпинделя детали:

1 – длина дуги резания (мм по левой шкале), 2 – поперечная подача (мм/с по левой шкале), 3 – частота вращения шпинделя (об/мин по правой шкале), 4 – сила резания (Н по правой шкале)

и при увеличении значений поперечной подачи цикла обработки в 1,5 раза.

Сравнение осциллограмм (смотри рис.5) показывает, что, не смотря на увеличение длины дуги резания, что естественно при увеличении глубины резания, диапазон изменения силы резания уменьшился, а время цикла составило всего 7,6с.

Следует отметить, что для реализации такого закона управления на станке он должен быть оборудован соответствующим контроллером управления частотой вращения двигателя шпинделя детали подобно современным токарным станкам с ЧПУ, которые способны выполнять управление в соответствии с опцией SSV – Spindle Speed Variation.

Выводы

1. Процесс шлифования кулачков звездочки дифференциала моста автомобиля отличается существенной нестационарностью, вызванной измерением дуги резания при формообразовании контура кулачков и может характеризоваться аналогом скорости срезания припуска. Современные шлифовальные станки с ЧПУ позволяют выполнять операцию шлифования кулачков с управлением режимом обработки, однако отсутствие средств проектирования управляющей программы, стабилизирующей процесс резания не позволяет повысить эффективность операции.
2. Предлагается новая методика проектирования управляющей программы, которая состоит из последовательного выполнения трех этапов. На первом этапе создается цифровая геометрическая модель контура детали и заготовки с привязкой к системе координат, в которой будет реализована обработка. На втором этапе выполняется компьютерное моделирование обработки с использованием основной процедуры, позволяющей автоматически определять аналог скорости срезания припуска в функции координаты формообразования в течение всего цикла обработки. И, наконец, на третьем этапе с помощью полученного файла моделирования в специальной прикладной программе проектируется закон управления, стабилизирующий процесс резания по его главной характеристике MRR.
3. Для автоматизации первых двух этапов предлагается прикладная программа, которая выполняет моделирование всего цикла шлифования, причем с заданным законом управления поперечной подачей, а

данные моделирования сохраняются в виде файла, содержащего цифровую модель зависимости силы резания от полярного угла поворота. Такая модель является исходной для проектирования управления частотой вращения шпинделя детали станка с ЧПУ.

4. Формирование управления частотой вращения шпинделя детали станка с ЧПУ необходимо выполнять с помощью специально созданной прикладной программы, которая сглаживает исходный закон с ограничением его по заданному максимально допустимому ускорению. Моделирование процесса шлифования кулачков звездочки при спроектированном управлении показало возможность повышения производительности не менее чем в 1,5 раза, что позволяет рекомендовать методику к практическому применению на шлифовальных станках с ЧПУ, оборудованных контроллером управления частотой вращения двигателя шпинделя детали.

Підвищення ефективності шліфування зовнішньої зірочки кулачкового диференціала

Ю.В. Петраков

Анотація. Представлена нова методика і прикладна програма для автоматизації програмування операції шліфування кулачків зовнішньої зірочки самоблокуючого диференціала підвищеного тертя на шліфувальному верстаті з ЧПК. Програма базується на створеній цифровій моделі процесу шліфування, яка дозволяє виконувати моделювання в ході якого визначити головну характеристику процесу – швидкість зрізування припуску (MRR – Material Removal Rate). Отриманий файл даних моделювання містить масив даних сили різання з прив'язкою до полярного кута контуру зірочки, за допомогою спеціально розробленої прикладної програми використовується для проектування закону управління частотою обертання шпинделя деталі, який забезпечує певну стабілізацію процесу різання. Моделювання процесу шліфування з управлінням довело, що, при збереженні вихідного діапазону зміни MRR процесу, можливо збільшення продуктивності не менш ніж в 1,5 рази.

Ключові слова: зірочка кулачкового диференціалу, шліфувальний верстат з ЧПК, комп'ютерне моделювання.

Improving the grinding efficiency of the external camshaft sprocket

Yuri Petrakov

Abstract. A new technique and application program for automating the programming of the operation of grinding the cams of the outer sprocket of the limited slip differential on a CNC grinding machine is presented. The program is based on the created digital model of the grinding process, which allows modeling and determining the main characteristic of the process - MRR - Material Removal Rate. The resulting simulation file, containing an array of cutting force data with reference to the polar angle of the sprocket contour, with the help of another specially developed application program, is used to design the law governing the spindle speed of the workpiece, which provides a certain stabilization of the cutting process. Modeling of grinding with this control shows that if the original MRR variation range of the process is preserved, it is possible to increase the productivity of the operation by at least 1.5 times.

Keywords: camshaft sprocket, CNC grinding machine, computer simulation.

References

1. Toyota Bomb, Gaz 66, UAZ, Great Wall в болоте off-road 4x4, <https://www.youtube.com/watch?v=LwGia6zt4f4>
2. Главная передача и дифференциал, http://stroy-technics.ru/gallery/jekspluatacija-avtotransportnyh-sredstv/image_14_32.gif
3. STUDER SOFTWARE, <https://www.studer.com/en/products/software/overview.html>
4. Camshaft grinding machines, <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/camshaft-grinding-machine-88639.html>
5. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 408 с.
6. Klocke F. Modelling and Simulation in Manufacturing Technology „Modeling and Simulation of Grinding processes“ http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/f786439a4c53fb78c125709f0055702f/v10_grinding_ii.pdf
7. Aurich J.C., Biermann A.D., Blum E.H. Modelling and simulation of process: machine interaction in grinding // Production Engineering Research and Development (2009) 3: pp. 111–120, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-008-0137-x>
8. David A. Stephenson, John S. Agapiou Metal Cutting Theory and Practice // CRC Press New York, 2016. - 932 p.
9. Process monitoring in non-circular grinding with optical sensor Claus P. Keferstein, Daniel Honegger, Hugo Thurnherr, Bernard Gschwend CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) pp 533–536 journal homepage: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>
10. Петраков Ю.В. Программирование операций врезного круглого шлифования на станках с ЧПУ // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування - 2014. - Том 70, №1. - С. 10 - 18.