

## ВЛИЯНИЕ ППД НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ

Горюнова Ю.А. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Надежность работы машин напрямую связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-химическими параметрами. При эксплуатации детали машин контактируют друг с другом или с окружающей средой. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышения температур и давлений роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, должна иметь сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности.

Эти все параметры достигаются поверхностным пластическим деформированием (ППД), при котором стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. В результате упрочняется поверхностный слой, повышается износостойкость, стойкость к коррозионным воздействиям и т.д. Во многих случаях применением ППД удается повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, в 1,5 – 3 раза и увеличить срок службы деталей в десятки раз.

В данной статье рассмотрено влияние ППД на формирование поверхностного слоя при обкатывании детали типа вал роликом.

Следует учитывать, что обработка ППД имеет по сравнению с обработкой резанием ряд преимуществ:

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура в поверхностном слое;
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;
- отсутствуют термические дефекты;
- стабильны процессы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности;
- можно достигать минимального параметра шероховатости поверхности ( $Ra=0,1 \dots 0,05$  мкм и менее), сохраняя исходную форму заготовок;
- можно уменьшить шероховатость поверхности в несколько раз за один рабочий ход;
- создается благоприятная форма микронеровностей с большей долей опорной площади;
- можно образовывать регулярные микрорельефы с заданной площадью углублений для задерживания смазочного материала;
- создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;
- плавно и стабильно повышается микротвердость поверхности.

Указанные и другие преимущества ППД обеспечивают повышение износостойкости, сопротивления усталости, контактной выносливости и др. эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей на 20 – 50%, а в некоторых случаях – в 2 – 3 раза при условии выбора в каждом конкретном случае наиболее рационального метода и оптимальных режимов обработки.

Необходимо также учитывать следующие особенности методов ППД:

- подавляющее большинство методов не повышает геометрической точности поверхности, обычно сохраняется точность, достигнутая на предыдущей операции;
- в связи с созданием полезных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое при обработке нежестких деталей (толщиной 3 – 5 мм) может происходить деформация поверхности 5 – 10 мкм и более;
- в связи с пластическим течением металла при использовании некоторых методов обработки ППД на кромках обрабатываемых поверхностей образуются наплывы металла толщиной 0,03 – 0,3 мм.

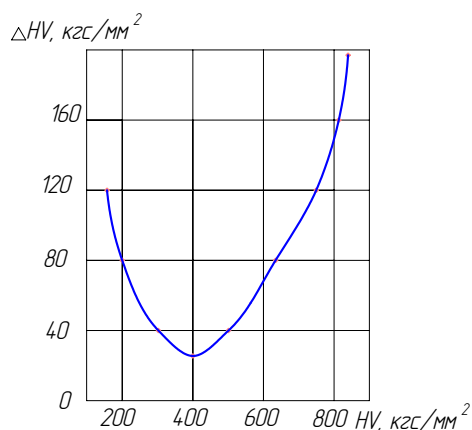


Рис. 1. Зависимость степени деформированного упрочнения от способности металлов к упрочнению

Степень деформированного упрочнения зависит не только от режимов ППД но и от способности металлов к упрочнению (рис. 1).

ППД дает существенное повышение долговечности по сравнению с механической обработкой (например по сравнению со шлифованием при обкатывании роликом долговечность повышается в 3 – 7,5 раз).

Особенно эффективно применение обработки ППД деталей с различными концентраторами напряжений. Увеличение предела выносливости при многоцикловой усталости тем выше, чем больше концентрация напряжений. В данном случае ППД как упрочняющий метод обработки имеет преимущество по сравнению с термическими и химико-термическими методами.

Следует отметить что на высоту неровностей, образующихся при обкатывании роликом большее влияние оказывает давление в контакте, продольная подача, размеры ролика, исходная шероховатость поверхности и физико-механические свойства материала обрабатываемой детали. Остальные параметры влияют незначительно.

Таким образом, в результате ППД уменьшается шероховатость поверхности, увеличивается твердость (микротвердость) металла, в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения. Все это улучшает эксплуатационные свойства детали – повышается выносливость детали в 1,5 – 2,3 раза, сопротивление схватыванию, контактная выносливость и др. Особенно эффективным является упрочнение деталей, имеющих конструктивные или технологические концентраторы напряжений, выточки, галтели и др. Достоинством ППД является технологическая универсальность и экономичность метода.

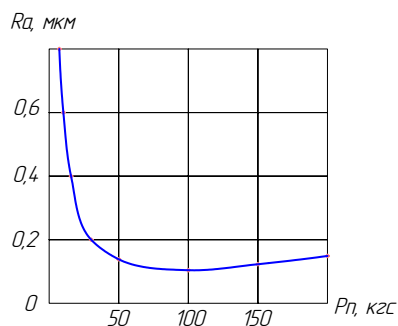


Рис. 2. Зависимость шероховатости от давления при обкатывании роликом для закаленной стали 20X2H3A (HRC 50...60).

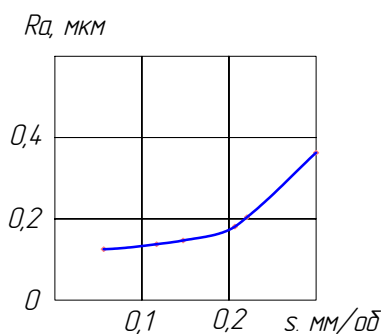


Рис. 3. Зависимость шероховатости от подачи при обкатывании роликом для закаленной стали 20X2H3A (HRC 50...60).

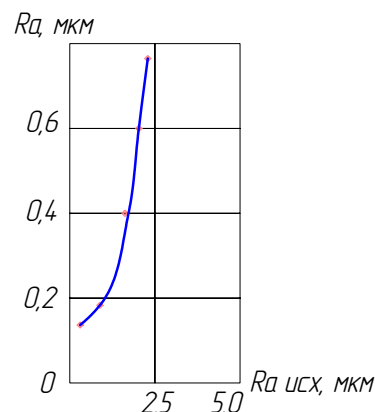


Рис. 4. Зависимость шероховатости от исходной шероховатости при обкатывании роликом для закаленной стали 20X2H3A (HRC 50...60)

**Перечень ссылок:** 1. Машиностроение. Энциклопедия/ Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология изготовления деталей машин Т. III – 3/ А. М. Дальский, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А. Г. Суслова. 2000.840 с., ил. 2. Одинцов Л. Г, Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987, 328 с., ил. 3. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М., Машиностроение, 1978, 152 с., ил. 4. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М., Машиностроение, 2002, 300 с., ил.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН В ПОЛИМЕРНОЙ СВЯЗКЕ ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

**Кольчик В.В., Байков А.В., Феник Л.Н.** (кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Для разработки модели расчета шероховатости обработанной поверхности необходима информация о характере распределения вершин алмазных зерен по высоте и на поверхности шлифовального круга. На операциях финишной обработки (тонкое шлифование и предварительное полирование), на которые наиболее важно прогнозировать шероховатость обработанной поверхности, применяют инструмент на эластичной полимерной связке, что вносит определенную специфику в характер контактного взаимодействия инструмента и детали. Вследствие перемещения алмазных зерен в связке под действием сил резания изменяется распределение вершин зерен по высоте рабочей поверхности круга, соответственно меняются параметры эффективного профиля.

Анализ перемещения вершины абразивного зерна связан с изучением напряженно – деформированного состояния эластичной связки в месте контакта ее абразивным

зерном под действием на него сил резания. Данная задача решается обычно численно с использованием метода конечных элементов [1]. В рассматриваемом случае задача решалась в ППП Cosmos Works. Расчеты проводились для алмазных зерен, размеры которых соответствуют зернистости 100/80, 63/50 и 40/28, геометрия контура которых и размеры определены из условия обеспечения наиболее полного соответствия между габаритными размерами и объемом реального зерна [2]. При решении задачи рассматривались варианты упругой матрицы с различными физико-механическими свойствами: модуль упругости композиции принимал значение от  $E=1000$  МПа до  $E=3500$  МПа, соответственно коэффициент Пуассона от  $\nu=0,43$  до  $\nu=0,34$ . Задача определения напряженно-деформированного состояния связки шлифовального инструмента решалась для ряда значений нормальных усилий на зерне, изменяющихся от  $P=0,005$  Н до  $P=0,2$  Н. Кроме этого варьировалась величина заглубления зерна в связку от  $h_3=0,65l$  до  $h_3=0,95l$ , где  $l$  – габаритная длина модели зерна. Величину заглубления (заделки) выражали в более принятом относительном виде:  $\varepsilon=h_3/l$ .

Анализ полученных данных показывает, что зависимость величины перемещения вершины алмазного зерна (или другими словами - погружения алмазного зерна в связку) от нормальной силы носит линейный характер для всех рассматриваемых размеров алмазных зерен, для различной глубины заделки зерна и для полимеров всех исследуемых характеристик.

Как пример, на рисунке 1 приведены зависимости величины перемещения вершины алмазного зерна от прилагаемого усилия при относительной заделке зерна  $\varepsilon=0,65$

для различной величины зернистости и модуля упругости связки.

Как видно из графика зависимость величины перемещения абразивного зерна ( $\Delta Y$ ) от величины прикладываемой силы ( $F$ ) носит линейный характер:

$$\Delta Y = k \cdot F, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности между величиной перемещения и силой определяется физико-механическими свойствами связки, в частности модулем упругости, и размером алмазного зерна. При других рассматриваемых значениях заглубления зерна в полимерной связке зависимость «перемещение-сила» имеет аналогичный характер. С увеличением модуля

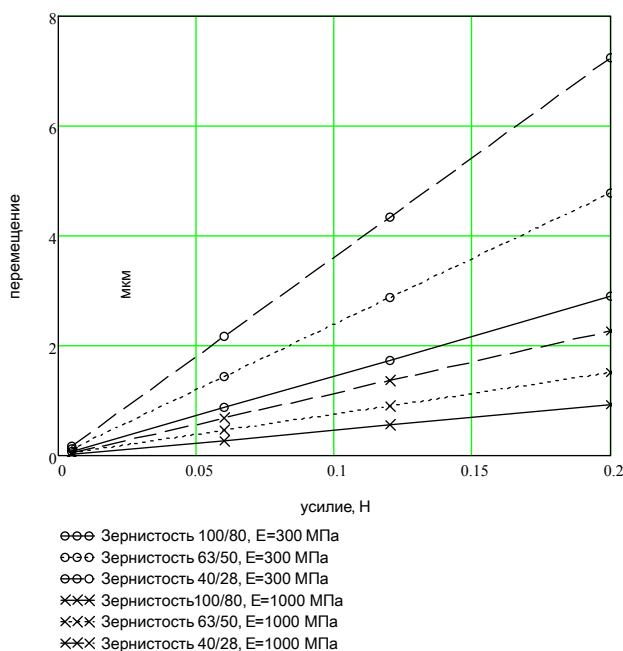


Рис. 1. Зависимость величины перемещения вершины алмазного зерна от прилагаемого усилия

упругости угол наклона прямой с осью абсцисс уменьшается. С увеличением размера алмазного зерна угол наклона прямой также уменьшается, что можно объяснить увеличением объема деформируемого фрагмента связки шлифовального круга.

Выявленная закономерность перемещения абразивного зерна в полимерной мат-

рице от величины прилагаемой силы позволяет ввести показатель обобщенной податливости связки  $k$ , определив его как отношение величины погружения зерна в связку  $\Delta Y$  к нормальной силе  $F$ . В этом случае можно рассматривать зависимость величины обобщенной податливости связки от модуля упругости связки и величины заглубления абразивного зерна. На рисунке 2 приведена данная зависимость для абразивного зерна зернистостью 100/80. Для абразивных зерен зернистостью 63/50 и 40/28 графики располагаются эквидистантно представленному на рисунке 2, причем значение податливости обратно пропорционально размеру абразивного зерна.

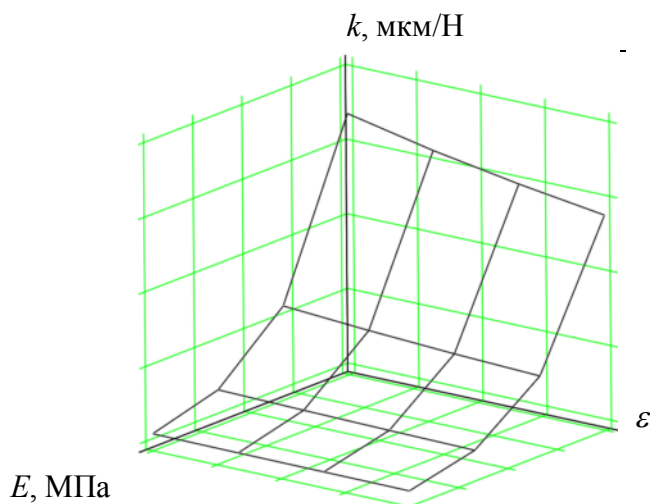


Рис. 2. Зависимость обобщенность податливости связки шлифовального круга от модуля упругости связки  $E$  и величины относительной заделки зерна  $\varepsilon$

зерна в связке от размера зерна, можно обобщить зависимость податливости связки от модуля упругости связки и относительной заделки зерна. Для этого следует рассматривать приведенное усилие на зерне, определяя его как отношение величины прилагаемого усилия к размеру модели абразивного зерна (например, поперечному габариту, который соответствует размеру зернистости [2]):

$$F' = \frac{F}{a}, \quad (2)$$

где  $a$  – размер поперечного сечения модели абразивного зерна.

На основании выражений (1) и (2) приведенная податливость связки определится выражением:

$$k_n = \frac{\Delta Y}{F'} = \frac{\Delta Y \cdot a}{F}. \quad (3)$$

Значения приведенной податливости связки, рассчитанные для рассматриваемых значений зернистости, практически совпадают.

Как видно из графика податливость, также как и перемещение вершины зерна существенно зависит от величины упругости связки и значительно менее от величины относительной заделки зерна. При увеличении глубины заделки в 1,5 раза перемещение вершины зерна уменьшается на 15÷18%. Следовательно, если величина заглубления алмазных зерен, участвующих в контакте с обрабатываемым материалом различается на 5÷15%, данным фактором можно пренебречь без существенной потери точности расчетов.

Вследствие пропорциональности зависимости величины перемещения абразивного

Характер зависимости приведенной податливости от круга от модуля упругости связки  $E$  и величины относительной заделки зерна  $\varepsilon$  представлен на рисунке 3.

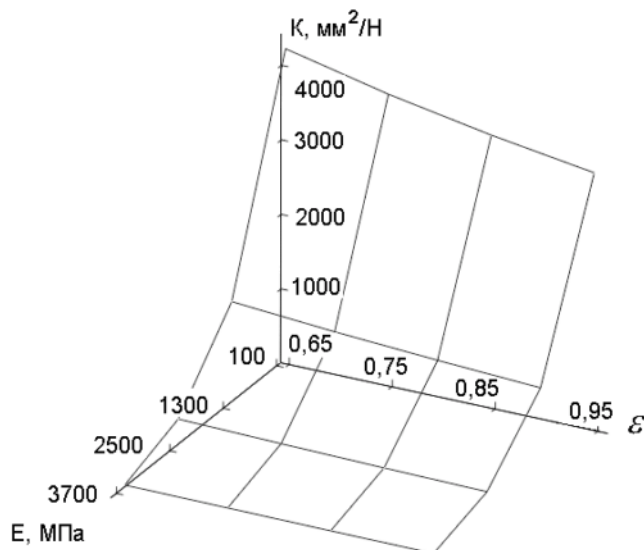


Рис. 3. Зависимость приведенной податливости связки шлифовального круга от модуля упругости связки  $E$  и величины относительной заделки зерна  $\varepsilon$

Таким образом, информация о закономерности поведения вершины алмазного зерна в контакте с обрабатываемым материалом дает возможность прогнозировать параметры микрорельефа эластичного шлифовального инструмента в момент контакта с обрабатываемым материалом, и, соответственно, качество получаемой поверхности при обработке.

**Список литературы:** 1. Желобов Н.Г., Огарышев С.А., Петухов В.И. и др. Напряженно-деформированное состояние упругой матрицы при погружении абразивного зерна под действием нормальной нагрузки // Совершенствование процессов обработки в машиностроении. Пермь, 1990. С. 77-83. 2. Байков А.В. Моделирование алмазных зерен для инструмента с ориентированным их расположением // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. научн. тр. -Донецк: ДонГТУ, 1997.- Вып. 4. С. 12-18.

## НОВЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВС

Кудашин И.И., Миронов Д.С., Холодова С.Н. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Рассмотрение внутрицилиндровых процессов в поршневом двигателе внутреннего сгорания (ПДВС) с позиций нелинейной динамики поднимает две проблемы, которые не решаются регулярными численными методами [1]. Первая состоит в отыскании стационарных и/или равновесных состояний, вторая – в быстром прогнозировании отклика эволюционирующей физико-химической системы на управляющие воздействия. Источник проблем –высокая размерность и многомасштабность рабочего процесса ПДВС как динамической системы. Определенные надежды в предметных исследованиях связаны с применением генетических алгоритмов и нейросетей [2].

В целях адекватной компьютерной имитации рабочего процесса в ПДВС авто-рами разработаны оригинальный генетический алгоритм отыскания равновесного и/или стационарного состояния физико-химической системы с реакциями и фазовыми переходами.

Определение равновесного состава некоторой фиксированной массы реагирующей, например, однофазной среды при заданных температуре и давлении осуществляется путем минимизации суммарного термодинамического потенциала системы [3]

$$G = \sum_j \frac{m_j}{\mu_j} \cdot \left[ g_j + RT \left( \ln(M \cdot P) + \ln \left( \frac{m_j}{\mu_j} \right) \right) \right] \rightarrow \min \quad (1)$$

при материальных ограничениях

$$\alpha \cdot \mathbf{m} - \mathbf{m}_a = \mathbf{0}. \quad (2)$$

В (1)-(2)  $\alpha = \{\alpha_{i,j}\}$  – массовая доля атомов  $i$ -го сорта в веществе  $j$ ;  $\mathbf{m} = \{m_j\}$  – вектор масс веществ;  $\mathbf{m}_a = \{m_{a,i}\}$  – вектор масс атомов сорта;  $\mu_j$  и  $g_j$  – соответственно молярная масса  $j$ -го вещества и его химический потенциал;  $M$  и  $P$  – общие масса и давление соответственно;  $g_j(T) = H_j + Cp_j(T - 298) - T(S_j + Cp_j \ln T / 298)$ , где  $H_j$ ,  $Cp_j$ ,  $S_j$  – соответственно энтальпия образования, теплоемкость при постоянном давлении и энтропия  $j$ -го вещества при температуре  $T = 298$  К

Решить задачу (1)-(2), используя известные генетические алгоритмы [1], препятствуют жесткие ограничения (2). Поэтому вместо условного минимума (1)-(2) ищут абсолютный минимум модифицированного функционала:

$$G = \sum_j \frac{m_j}{\mu_j} \cdot \left[ g_j + RT \left( \ln(M \cdot P) + \ln \left( \frac{m_j}{\mu_j} \right) \right) \right] + \nu \cdot (\alpha \cdot \mathbf{m} - \mathbf{m}_a)^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

При высокой размерности  $i, j$  задачи вероятность выхода популяции на ограничения (1) ничтожна, и процесс поиска приходится обрывать в одном из локальных минимумов. Понижение размерности системы путем исключения компонентов на основании (1) приводит к артефактам типа отрицательных концентраций или масс.

Научная новизна предлагаемого подхода состоит в переносе ограничений (2) из адаптивной функции в кодировку хромосома: в классическом алгоритме кодировка гена ограничена фиксированным интервалом  $[a, b]$ , а в модифицированном этот интервал приобретает определенную подвижность в соответствии с ограничениями (2). При каждой генерации гена ищутся граничные значения  $a$  и  $b$  с учетом реализации предыдущего гена и ограничений (2). Физические соображения позволяют заметно сузить интервал локализации экстремума как сверху (ресурсом свободных атомов), так и снизу (устранением невязки материального баланса). Фактически алгоритм позволяет выбрать базовые компоненты. Резюмируя, грубые локализирующие свойства ограничений (2) мы вынесли в алгоритм, а тонкие уточняющие – сохранили в самих уравнениях.

Особенности компьютерной реализации алгоритма показаны на рис. 1. Термодинамические константы реагентов, продуктов и промежуточных веществ хранятся в проблемно-ориентированной БД. Также реализованы функции импорта первичной термодинамической информации из стандарта программы STANJAN [4].



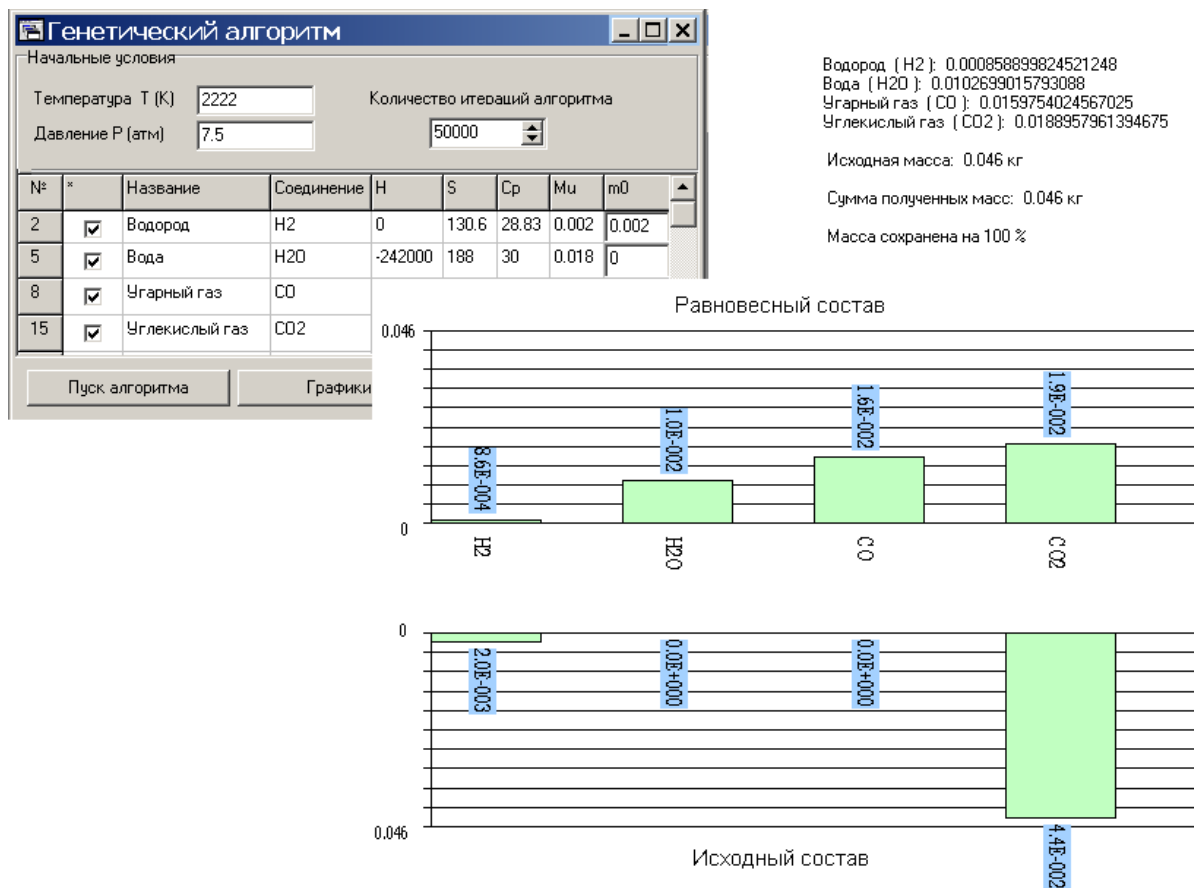


Рис. 1. Результат расчета равновесного состава в системе  $\text{CO}_2$  (1 моль) +  $\text{H}_2$  (1 моль)  $\leftrightarrow$   $\text{CO}$  +  $\text{H}_2\text{O}$  при  $T = 2222 \text{ K}$ ,  $P = 7.5 \text{ атм}$

Приведенные на рис. 2 результаты сопоставления рассчитанного (посредством разработанного генетического алгоритма) равновесного состава продуктов сгорания различных моторных и ракетных топлив с данными работ [5,6] свидетельствуют, что главные компоненты химического равновесия определяются нашим методом вполне надежно. Верификация алгоритма осуществлялась на интересных для авторов системах: крекинг углеводородов, горение традиционных нефтегазовых и перспективных спиртовых моторных топлив, продукты сгорания различных ракетных топлив.

В изученных при отработке генетического алгоритма системах содержание основных компонентов определялось при помощи генетического алгоритма с приемлемой погрешностью. Зная содержание всех ведущих компонентов, нетрудно рассчитать также важные, например, в плане токсичности малые составляющие равновесной смеси. Это ценно, поскольку размерность задачи существенно зависит от того, насколько верно удастся выбрать номенклатуру главных компонентов в химическом равновесии.

Интеграция нашего генетического алгоритма в комплекс «Мотор» [7] позволила с большей степенью достоверности: 1) рассчитывать энергетические характеристики ПДВС и токсичность выхлопа по  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{RCHO}$ ,  $\text{NO}$  – при использовании различных топлив и на переходных режимах; 2) выявлять ведущие физико-химические процессы во внутрицилиндровой кинетике; 3) анализировать динамику внутрицилиндровых процессов и вырабатывать способы их оптимизации; 4) разрабатывать эффективные способы управления.



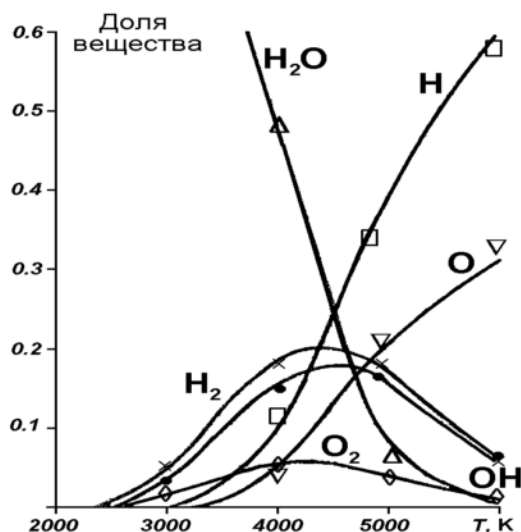


Рис. 2. Равновесный состав системы  $\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2 - \text{OH} - \text{O}_2 - \text{O} - \text{H}$  при давлении 5 атм в диапазоне температур 2000 – 6000 К, рассчитанный при помощи нашего генетического алгоритма (соответствующие парциальные концентрации обозначены символами  $\Delta$  –  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\times$  –  $\text{H}_2$ ,  $\bullet$  –  $\text{OH}$ ,  $\diamond$  –  $\text{O}_2$ ,  $\square$  –  $\text{H}$ ,  $\nabla$  –  $\text{O}$ ), с данными [6] (сплошные линии)

**Список литературы:** 1. Физико-химические процессы в газовой динамике. Компьютеризованный справочник / Под ред. Г.Г. Черного и С.А. Лосева. – М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 434 с. 2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. Рудинского И.Д. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 216 с. 3. Джонсон К. Численные методы в химии: Пер с англ. – М.: Мир, 1983. – 288 с. 4. Reynolds W.C. The element potential method for chemical equilibrium analysis: implementation in the interactive program STANJAN version 3. – Dept. of Engineering, Stanford University, 1986. 5. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 740 с. 6. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей. – М.: Оборонгиз, 1962. – 476 с. 7. Ладоша Е.Н., Яценко О.В., Цымбалов Д.С. Системная имитация динамики ПДВС: фазовые переходы, турбулентность, реакции, ... / Свид. об офиц. рег. ПрЭВМ № 2009615832. – М.: РОСПАТЕНТ, 2009.

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ МУФТ

Михайлов А.Н., Михайлова Е.А., Михайлов Д.А.  
(кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства широко используются зубчатые муфты для соединения валов технологических систем работающих в условиях наличия перекосов и смещений соединяемых валов. При этом с увеличением быстроходности и нагруженности зубчатых муфт широко применяются зубчатые муфты с зубьями, имеющими бочкообразную форму рабочей поверхности. Вместе с тем, применяемая геометрия рабочей поверхности зубьев не позволяет в полной мере исключить неравномерное распределение нагрузки в зацеплении зубчатой муфты и уст-

ранить возникающие кромочные контакты зубьев в условиях наличия перекосов зубьев относительно друг друга (рис. 1) [1].

Для обеспечения выравнивания нагрузки в зацеплении зубьев зубчатых муфт и реализации линейных контактов рабочих зубьев муфт, работающих в условиях перекосов и смещений осей, разработана специальная геометрия зубьев, именуемая пространственно-модифицированная геометрия зубьев муфт [2, 3, 4]. Эта геометрия зубьев муфты обеспечивает выравнивание нагрузки в зацеплении и линейный контакт рабочих поверхностей зубьев при наличии их перекоса для центрируемых зубчатых муфт. Это связано с тем, что процесс получения пространственно-модифицированных зубьев муфты основан на разработанном способе обработки, базирующимся на втором способе Оливье и выполнении в процессе изготовления зубьев двух принципов [1].

Вместе с тем, можно отметить, что технология получения пространственно-модифицированной геометрии зубьев основанная на втором способе Оливье не позволяет получать заданную геометрию высокопроизводительными способами. Это связано с тем, что для осуществления обработки с использованием второго способа Оливье применима только хонинговальная операция с использованием внутреннего зацепления инструмента и обрабатываемых зубьев втулки муфты. При этом снимаемый припуск при хонинговании зубьев обычно составляет 50 ... 70 мкм. Поэтому этим методом снимать большие припуски для пространственно-модифицированных зубьев, в ряде случаев, является длительным низко производительным процессом, а для зубьев крупного модуля вообще не представляется возможным. Это не позволяет получать точную пространственно модифицированную геометрию зубьев муфт.

На основании выше изложенных доводов, целесообразно выполнять предварительное изготовление зубьев, с геометрией рабочей поверхности близкой к пространственно-модифицированной, но получаемой высокопроизводительными методами. При этом на завершающей операции предлагается получать точную пространственную модификацию зубьев, обработка которой основывается на втором способе Оливье. В этом случае, припуски на обработку можно закладывать в пределах до 70 мкм и получать необходимую пространственно-модифицированную геометрию зубьев муфт.

Однако, для решения этих вопросов необходима разработка определенной структуры технологического процесса, обеспечивающего высококачественными и высокопроизводительными способами изготовление пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт.

Разрабатываемая технология, базирующаяся на втором способе Оливье [1] изготовления сопряженных поверхностей позволяет изготавливать геометрию зубьев с линейным контактом рабочих поверхностей и равномерным распределением нагрузки между зубьями [2, 3, 4].

Второй способ Оливье изготовления пространственных зацеплений с линейным касанием поверхностей зубцов основывается на двух условиях:

1. Нарезание поверхности зубцов одного из звеньев механизма (зубчатой муфты) должен производиться инструментальной поверхностью, полностью совпадающей с поверхностью другого звена в передачи (зубчатой муфты).

2. При изготовлении зубьев муфты на технологической системе структура относительных движений инструмента и заготовки должна быть такая же, какая имеется в зубчатом механизме (зубчатой муфте) при эксплуатации.

Основываясь на втором способе Оливье для второго условия Оливье, разработана структура движений при преобразовании систем координат в относительных движениях огибающей и огибаемой поверхностей зубьев ПМЗМ при наличии перекоса осей.

На рис. 1 представлены структура относительных движений систем координат в процессе получения пространственно-модифицированной поверхности зубьев.

Как известно из аналитической геометрии, от системы координат  $x_1, y_1, z_1$  к системе координат  $x_2, y_2, z_2$ , имеющих единое начало координат, можно перейти при помощи последовательного выполнения трех поворотов  $a, b, c$  (рис. 1) вокруг себя осей координат путем задания трех углов Эйлера в трехмерном евклидовом векторном пространстве.

Сначала нужно повернуть систему  $x_1, y_1, z_1$  вокруг оси  $Oz_1$  на угол  $\psi_1$ , получим систему координат  $x', y', z'$  - вокруг оси  $Oy'$  на угол  $\omega$ , получим систему  $x'', y'', z''$ . Далее, поворачивая систему  $x'', y'', z''$  - около оси  $Oz''$  на угол  $\psi_2$ , получим систему  $x_2, y_2, z_2$ . Для выполнения второго условия второго способа Оливье необходимо чтобы углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  были равны и отображались выражением

$$\psi_1 = \psi_2 = \psi,$$

где  $\psi$  - угол поворота зацепления.

Для решения вопроса реализации первого условия второго способа Оливье необходимо выполнить инструмент в виде эвольвентной поверхности. В координатной записи уравнения эвольвентного профиля инструмента имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_b [\sin(\varphi - \varphi_c) - \varphi \cos(\varphi - \varphi_c)]; \\ y_1 &= r_b [\cos(\varphi - \varphi_c) + \varphi \sin(\varphi - \varphi_c)]; \\ z_1 &= r_b \operatorname{tg} v. \end{aligned} \right\}$$

где  $r_b$  - радиус основного цилиндра инструмента;

$\varphi$  - параметрический угол эвольвенты;

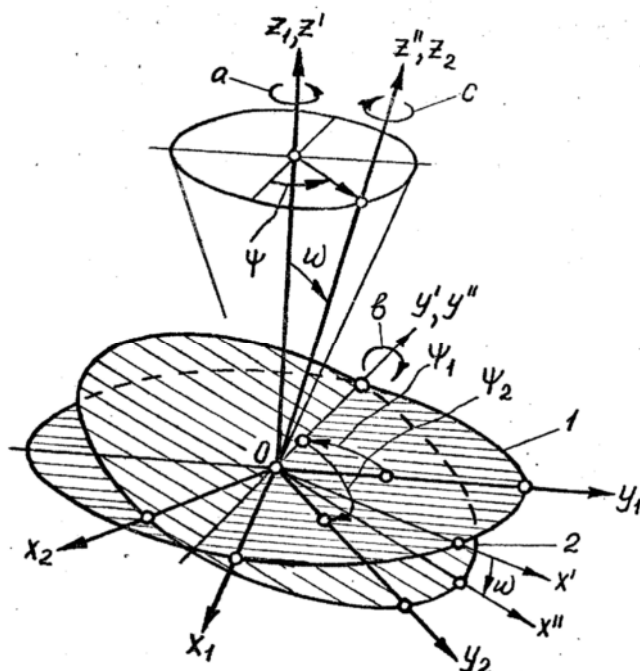
$v$  - параметрический угол точки в продольном сечении.

Здесь  $\varphi_c = \frac{\pi}{2z} + \operatorname{inv} \alpha_w$ , где  $z$  - число зубьев инструмента;

$\operatorname{inv} \alpha_w$  - эвольвентный угол, соот-

ветствующий точке профиля на делительном цилиндре.

Рис. 1. Структура движений при преобразовании систем координат в относительных движениях огибающей и огибаемой поверхностей зубьев при наличии перекоса осей



ветствующий точке профиля на делительном цилиндре.

Таким образом, второй способ Оливье дает возможность решать вопросы получения теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфты. Поэтому в данной работе предложен способ и устройство для его осуществления, позволяющие на завершающей стадии технологического процесса доводить (хонинговать) рабочую поверхность пространственно-модифицированных зубьев муфты.

Вместе с тем, можно отметить, что технология получения пространственно-модифицированной геометрии зубьев основанная на втором способе Оливье не позволяет получать заданную геометрию высокопроизводительными способами. Это связано с тем, что для осуществления обработки с использованием второго способа Оливье

применима только хонинговальная операция с использованием внутреннего зацепления инструмента и обрабатываемых зубьев втулки муфты. При этом снимаемый припуск при хонинговании зубьев обычно составляет 50 ... 70 мкм. Поэтому этим методом снимать большие припуски для пространственно-модифицированных зубьев, в ряде случаев, является длительным низко производительным процессом, а для зубьев крупного модуля вообще не представляется возможным. Это не позволяет получать точную пространственно модифицированную геометрию зубьев муфт.

На основании выше изложенных доводов, целесообразно выполнять предварительное изготовление зубьев, с геометрией рабочей поверхности близкой к пространственно-модифицированной, но получаемой высокопроизводительными методами. При этом на завершающей операции предлагается получать точную пространственную модификацию зубьев, обработка которой основывается на втором способе Оливье. В этом случае, припуски на обработку можно закладывать в пределах до 70 мкм и получать необходимую пространственно-модифицированную геометрию зубьев муфт.

Поэтому данная работа основывается на важнейшем технологическом принципе последовательного приближения структуры и параметров технологического процесса изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты ко второму способу Оливье.

Используя предложенные теоретические положения, разработана структура технологического процесса, включающая выполнение следующих операций:

1. Способа обработки зубьев муфт методом копирования. Он основывается на получении приближенной геометрия, получаемой фрезерованием модульными дисковыми фрезами с перемещением инструмента по линии смещения исходного контура по специальной линии. В этом случае линия смещения исходного контура определяется на основании точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфты.

2. Способа обработки зубьев муфт методом обкатки. Он основывается на получении приближенной геометрия, получаемой фрезерованием модульными червячными фрезами с перемещением инструмента по линии смещения исходного контура по специальной линии. В этом случае линия смещения исходного контура также определяется на основании точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфты.

3. Способа обработки зубьев муфт методом копирования или обкатки с обеспечением кинематической структуры движений при обработке идентичной эксплуатационной в механизме. Он основывается на получении приближенной геометрия фрезерованием модульными дисковыми или червячными фрезами. В этом случае выполняется только второе условие второго способа Оливье.

4. Способа обработки зубьев муфт методом обкатки с обеспечением кинематической структуры движений при обработке идентичной эксплуатационной в механизме. Он основывается на получении приближенной геометрия получаемой протягиванием специальными протяжками. В этом случае выполняется второе условие второго способа Оливье. При этом частично выполняется первое условие второго способа Оливье.

5. Разработка способа отделочной обработки. Реализация полной адекватности двух условий второго способа Оливье. Эта операция может выполняться или хонингованием или другими методами, например электроэрозионной обработкой.

Можно отметить, что две первые операции могут выполняться обычными традиционными методами с использованием перемещения инструмента по линии смещения исходного контура, параметры которой определены в работе [5]. При этом третья и четвертая операция может выполняться на специальном оборудовании, которое должно

спроектировано в соответствии с изобретениями, представленными в работах. А именно третья операция с использованием работ, а четвертая в соответствии с работой.

Последняя операция базируется на получении точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт. В этом случае доводка может реализовываться хонингованием или электроэрозионным методом с полным выполнением двух условий второго способа Оливье. При этом получаемая геометрия пространственно-модифицированных зубьев муфты будет полностью соответствовать точной геометрии.

Таким образом, приведенный комплекс технологических операций обеспечивает последовательное приближение геометрии зубьев к точной пространственно-модифицированной геометрии. Здесь, по ходу технологического процесса (до последней операции) выполняется частичное выполнение двух условий второго способа Оливье с последовательным увеличением степени их приближения к полному выполнению. При этом на последнем этапе технологического процесса реализуется точная пространственно-модифицированная геометрия зубьев муфты за счет выполнения двух условий Оливье и припусков, не превышающих нормированных значений.

В заключении можно отметить, что выполненные комплексные исследования обеспечили возможность решить ряд задач связанных с разработкой технологического процесса изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты. Это позволило следующее:

- разработать общий подход последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии, получаемой с использованием второго способа Оливье;
- разработать конкретный технологический процесс приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии;

В целом выполненные исследования и разработанная технология позволяют комплексно решать задачи повышения качества и эффективности изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты.

**Список литературы:** 1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. - М.: Наука, 1968. - 584 с. 2. А.с. 1425374 (СССР) МКИ F16D 3/18. Зубчатая муфта / Михайлов А.Н. – Опубл. в БИ № 35, 1988. – 5 с. 3. Гитуни А. Синтез новой геометрии зубьев муфт // Материалы седьмого научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – Донецк: ДонНТУ, 2007. С. 624-626. 4. Михайлов А.Н., Гитуни А. Основы синтеза пространственно-модифицированных зубьев муфт // Автоматизация: Проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-техн. конф. 16 – 17 октября 2006 г. – Тула: ТулГУ, 2006. С. 11 – 13. 5. Михайлов А.Н., Гитуни А., Грубка Р.М. Упрочняющая термомеханическая обработка зубьев втулок зубчатых муфт // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. Вип. 33. С. 146-153.