

## Учредители

- Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук
- Московский государственный индустриальный университет

## Издатель

Московский государственный индустриальный университет

Журнал зарегистрирован 30 декабря 2004 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-19294.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

## № 1(34) 2013

Выходит 4 раза в год

ISSN 1815-1051

## В номере

### РЕДКОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Ганиев Р.Ф.**, академик РАН, директор Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

#### ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

**Скопинский В.Н.**, д.т.н., проф. (ФГБОУ ВПО МГИУ)

#### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Пановко Г.Я.**, д.т.н., проф. (ИМАШ РАН)

**Овчинников В.В.**, д.т.н., проф. (ФГУП РСК МИГ)

### ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

**Алешин Н.П.**, академик РАН, д.т.н., проф. (Москва)

**Асташев В.К.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Беляков Г.П.**, д.э.н., проф. (Красноярск)

**Бобровницкий Ю.И.**, д.ф.-м.н., проф. (Москва)

**Вайсберг Л.А.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)

**Горкунов Э.С.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Екатеринбург)

**Григорян В.А.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Дроздов Ю.Н.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Индейцев Д.А.**, член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф. (Санкт-Петербург)

**Колесников А.Г.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Кошелев О.С.**, д.т.н., проф. (Н. Новгород)

**Лунев А.Н.**, д.т.н., проф. (Казань)

**Махутов Н.А.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Москва)

**Перминов М.Д.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Петров А.П.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Полилов А.Н.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Поникаров С.И.**, д.т.н., проф. (Казань)

**Приходько В.М.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Москва)

**Резчиков А.Ф.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Саратов)

**Рототаев Д.А.**, д.т.н., проф., акад. РА РАН (Москва)

**Федоров М.П.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)

**Чаплыгин Ю.А.**, член-корр. РАН, д.т.н., проф. (Москва)

**Шляпин А.Д.**, д.т.н., проф. (Москва)

**Штриков Б.Л.**, д.т.н., проф. (Самара)

### ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**В.З. Мельников**

Обеспечение качества зубчатых передач на основе реализации многопарного зацепления ..... 2

**О.А. Троицкий, В.И. Стащенко**

Модернизация прокатного оборудования и особенности технологии электропластической прокатки ..... 9

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Ф.З. Бадаев, В.В. Рыбальченко, А.Х. Хайри, Н.А. Касатова, А.И. Айрих**

Определение кинетических параметров взаимодействия алюминий-магниевого сплава с водным раствором гидроксида натрия ..... 17

**А.Ю. Омаров, О.Л. Сидорцова, Ю.Г. Трифонов, А.Д. Шляпин**

Структура и фазовый состав порошков, полученных химическим диспергированием алюминий-магниевого сплава ..... 21

**Б.Л. Красный, В.П. Тарасовский, Ю.М. Мосин, А.Б. Красный, А.Ю. Омаров**

Исследование свойств порошков гидроксида алюминия ..... 26

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАШИН И СИСТЕМ

**В.Н. Скопинский, Н.А. Берков, Н.В. Вожова, М.Р. Гилязов**

Расчетное определение предельной пластической нагрузки для тройниковых соединений трубопроводов при комбинированном нагружении ..... 36

**О.Ф. Трофимов**

Влияние нестационарности случайных процессов нагружения на усталостное повреждение в материалах конструкций ..... 46

### ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**А.С. Горобцов, Н.В. Чигиринская**

Проблемы и перспективы внедрения ФГОС в инженерное образование ..... 54

### ПОДГОТОВКА И ПЕРЕПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ

**Л.В. Кремлева, В.И. Малыгин, В.Т. Харитоненко**

Методика подготовки инженерных кадров в научно-образовательных технологических центрах ..... 65

Информация для авторов ..... 72

## ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Подписка на журнал

«Машиностроение и инженерное образование»  
проводится в Издательстве МГИУ

Тел.: (495) 276-33-67. E-mail: mio@msiu.ru

Подписной индекс Роспечати 36942

### Уважаемые читатели!

*Журнал «Машиностроение и инженерное образование» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора или кандидата наук.*

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОПАРНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

**В.З. Мельников**

*Рассмотрена задача поиска эффективных способов повышения надежности и качества зубчатых передач, в частности, на основе их синтеза с многопарным зацеплением, что приводит к снижению нагрузки на зубья и, как следствие, к повышению прочностной выносливости и уменьшению уровня шума передач. Синтез передач с многопарным зацеплением осуществлен при высотной, а также высотно-профильной модификации исходного контура при условии обеспечения значения коэффициента торцевого перекрытия более двух. Установлено, что уменьшения уровня шума передач можно достигнуть путем снижения твердости материала зубьев при многопарном контакте. Приведены результаты геометрического расчета многопарных передач, а также сравнительного расчета передач с одно-, двух-, трехпарным зацеплением и зацеплением большей парности. Показано, что можно использовать зубчатые передачи с допустимой величиной подреза зубьев в целях увеличения коэффициента перекрытия и, следовательно, показателя парности зацепления.*

**Ключевые слова:** зубчатая передача, многопарное зацепление, исходный контур, модификация исходного контура.

## Введение

Требования к обеспечению надежности и качества зубчатых передач во многих случаях в значительной мере противоречивы. В связи с этим обеспечение качества передач можно осуществлять путем поиска решений, частично устраняющих возникающие противоречия. Реализация данной задачи возможна как традиционными методами, заключающимися в повышении точности изготовления и сопротивляемости действующим нагрузкам, так и методами на основе инноваций. Традиционные методы требуют значительных материальных затрат и не всегда приводят к желаемым результатам. К методам, использующим инновационные решения, можно отнести методы проектирования зубчатых передач с многопарным зацеплением [1–4]. Передачи, обеспечивающие постоянный контакт нескольких пар зубьев, имеют более высокие показатели по прочности, ресурсу и уровню шума по сравнению со стандартными передачами с однопарным зацеплением. Однако производство многопарных передач связано с относительной сложностью их параметрического расчета, проектирования и изготовления.

## Постановка задачи

В общем виде решение задачи реализации многопарного зацепления заключается в определении геометрии передач, удовлетворяющей условиям многопарного контакта, проведении проверочного расчета усталостной прочности передачи при нагружении, а также технологическом обеспечении процесса изготовления многопарной передачи.

При расчете геометрии передач в качестве показателя парности зацепления используют коэффициент торцевого перекрытия  $\varepsilon_\alpha$ , характеризующий отношение длины активной линии зацепления к шагу зацепления:

$$\varepsilon_\alpha = F(z_c, x_c, \alpha, h_a^*, \beta), \quad (1)$$

где  $z_c$  – суммарное число зубьев зубчатых пар;  $x_c$  – суммарный коэффициент смещений зубчатых пар;  $\alpha$  – угол профиля;  $h_a^*$  – коэффициент высоты головки исходного контура;  $\beta$  – угол наклона зубьев.

Расчет геометрии передач с многопарным зацеплением проводят при необходимых условиях по подрезанию, интерференции и заострению зубьев, соответствующих условию

$$\varepsilon_\alpha > 2. \quad (2)$$

В общем случае реализация условия (2) осуществляется путем высотно-профильной модификации зубьев при отрицательных смещениях исходного контура и следующих параметрах контура:  $\alpha \leq 20^\circ$ ;  $h_a^* > 1$ . В  $n$ -парной передаче, в которой  $n$  – целая часть коэффициента торцевого перекрытия  $\varepsilon_\alpha$ , показатель парности зацепления  $n$  определяют как функцию

$$n = \text{INT}(\varepsilon_\alpha), \quad (3)$$

где INT – оператор функции наибольшего целого числа, не превышающего заданного числового значения.

Активная линия зацепления состоит из двух участков, включающих в себя область  $n$ -парного и область  $(n+1)$ -парного зацепления. Целая часть коэффициента  $\varepsilon_\alpha$  характеризует область  $n$ -парного зацепления, а дробная часть – область  $(n+1)$ -парного зацепления. Расчет геометрии передач при условии (2) проводят на основе анализа потенциально возможных значений коэффициента торцевого перекрытия  $\varepsilon_{\alpha 0}$  [5]:

$$\varepsilon_{\alpha 0} = \frac{4h_a^*}{\pi \sin 2\alpha}. \quad (4)$$

Потенциально возможные значения коэффициентов  $\varepsilon_{\alpha 0}$  для наиболее часто применяемых исходных контуров представляют собой следующее:

$\alpha, ^\circ \dots\dots 20$	20	17,5	14,5
$h_a^* \dots\dots 1,0$	1,3	1,3	1,3
$\varepsilon_{\alpha 0} \dots\dots 1,980$	2,575	2,886	3,414

На основании приведенных данных можно заключить, что условие (2) для передач со стандартным исходным контуром в общем случае теоретически не осуществимо. Его реализация возможна только при нестандартных значениях параметров исходного контура. Начальной задачей реализации многопарного контакта является определение параметров зацепления, обеспечивающих в передаче заданный  $n$ -парный контакт зубьев.

### Решения задачи реализации многопарного контакта

Основным решением данной задачи является компьютерное моделирование многопарного зацепления на основе прикладных программ по расчету геометрии и прочности зубчатых передач. Методическое обеспечение прикладных программ составляют ГОСТ 16532–70 и ГОСТ

21354–87. Анализ зависимостей (1) и (4) показывает, что для решения указанной задачи необходима высотно-профильная модификация исходного контура.

В общем случае для изготовления передач с модифицированным исходным контуром требуется специальный зуборезный инструмент, соответствующий выбранному контуру. При массовом производстве передач использование специального инструмента вполне оправдано. Обеспечение эффективности единичного или мелкосерийного производства достигается путем применения врезного шлифования зубьев без фрезерования [6], что исключает необходимость в специальном инструменте.

Другим решением рассматриваемой задачи является проектирование передач только с высотной модификацией зубьев, когда  $\alpha = 20^\circ$ , а  $h_a^* > 1$ . В этом случае для изготовления передач можно использовать и стандартный инструмент, так как коэффициент высоты профиля инструмента  $h_0^*$ , например червячной фрезы, составляет не менее 2,5. В частности, за счет уменьшения радиального зазора в передаче до  $0,1m$  ( $m$  – модуль зуба) в допустимых пределах можно увеличивать высоту профиля зубьев и обеспечивать выполнение условия (2).

В качестве примера в табл. 1 приведены значения коэффициента  $\varepsilon_\alpha$  для отдельных цилиндрических прямозубых передач внешнего зацепления с высотной модификацией профиля согласно работе [7] и исходным данным, исключая подрезание, интерференцию и недопустимое заострение зубьев и удовлетворяющим условию (2) при различных допустимых значениях коэффициента  $h_a^*$  и коэффициента радиального зазора  $c^*$  (вариант 1 и вариант 2). Расчет геометрии передач проводили при  $m = 1$  мм, так как коэффициент  $\varepsilon_\alpha$  от модуля  $m$  не зависит.

Как видно из табл. 1, при высотной модификации исходного контура и использовании стандартного производящего контура полная высота зубьев может быть увеличена, например до  $2,4m$ , по сравнению со стандартной высотой, равной  $2,25m$ , что при неизменном диаметре впадин приводит к увеличению внешнего диаметра зубьев и коэффициента  $\varepsilon_\alpha$ .

Дальнейшее увеличение показателя парности зацепления возможно в основном путем уменьшения угла профиля  $\alpha$  и увеличения коэффициента высоты головки  $h_a^*$ , т.е. в результате высотно-профильной или только высотной