

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Розглянуто систему комплексних параметрів, вживана при технологічному забезпеченні експлуатаційних властивостей загартованих крупномодульних зубчастих коліс, методика двоступінчатого забезпечення даних властивостей із застосуванням графічних методів системної оптимізації. Наукова новизна досліджень авторів полягає в розробці методики багатокритеріальної оптимізації технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей деталей загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі застосування комплексних параметрів їх стану

Ключові слова: комплексні параметри, технологічне забезпечення, експлуатаційні властивості, зубчасті колеса

Рассмотрена система комплексных параметров, применяемая при технологическом обеспечении эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес, методика двухступенчатого обеспечения данных свойств с применением графических методов системной оптимизации. Научная новизна исследований авторов состоит в разработке методики многокритериальной оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей закаленных крупномодульных зубчатых колес на основе применения комплексных параметров их состояния

Ключевые слова: комплексные параметры, технологическое обеспечение, эксплуатационные свойства, зубчатые колеса

Ю. В. Тимофеев

Доктор технических наук, профессор
Кафедра технологии машиностроения
и металлорежущих станков
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина
E-mail: sk_np@rambler.ru

А. А. Ключко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра металлорежущих станков и инструментов
Донбасская государственная машиностроительная академия
ул. Шакинова, 76, г. Краматорск, Украина, 84313
E-mail: klochko21@rambler.ru

А. Н. Кравцов

Аспирант
Кафедра технологии машиностроения
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Россия, 620002
E-mail: zao-oniks@yandex.ru

1. Введение

Одной из главных задач в области станкостроения и машиностроения является значительное улучшение качества выпускаемых станков и машин, оборудования и приборов, повышение их технического уровня, производительности и надежности.

Эксплуатационные характеристики, стоимость и масса многих машин часто определяются долговечностью и надежностью передач, используемых в механических приводах. Выход из строя передач происходит в результате поломок зубьев и повреждений их рабочих поверхностей, вызванных выкрашиванием, износом, заеданием.

Эти повреждения возникают в различных местах поверхностей зубьев вследствие концентрации нагрузки, обусловленной неравномерным распределением ее вдоль контактных линий.

Повышенная концентрация нагрузки приводит к необходимости увеличивать расчетную нагрузку. Вместе с тем, все факторы, влияющие на величину расчетной нагрузки, взаимосвязаны, и увеличение одного приводит к изменению другого.

Поэтому для повышения качества передач важно обеспечить технологически систему геометрических (параметры макроотклонения, волнистости, шероховатости), физико-механических и комплексных параметров их состояния [1]. Эта система параметров характеризует эксплуатационные свойства при помощи комплексных параметров состояния поверхности с целью предупреждения выхода зубчатых передач из строя, таких как поломка зубьев, выкрашивание активных поверхностей (рис. 1) и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев (рис. 2) и заедание.



Рис. 1. Состояние активных поверхностей зубьев при наличии прогрессирующего выкрашивания

Повышение сопротивляемости зубьев выкрашиванию может быть достигнуто: увеличением приведенных радиусов кривизны соприкасающихся активных поверхностей зубьев, путем применения передач $X_{\Sigma} > 0$ или передач с нестандартными исходными контурами; увеличением точности изготовления зубчатых колес и монтажа передачи, обеспечением равномерного контактного слоя и шероховатости эвольвентной поверхности путем формообразования поверхностного слоя инструментом, имеющий радиус округления режущей кромки при минимальном угле скольжения зуба фрезы [2], а также повышением механических характеристик материалов зубчатых колес; применением механического, термического или химико-термического упрочнения активных поверхностей зубьев, правильным выбором смазки и использованием эффекта повышенной нагрузочной способности головок зубьев.

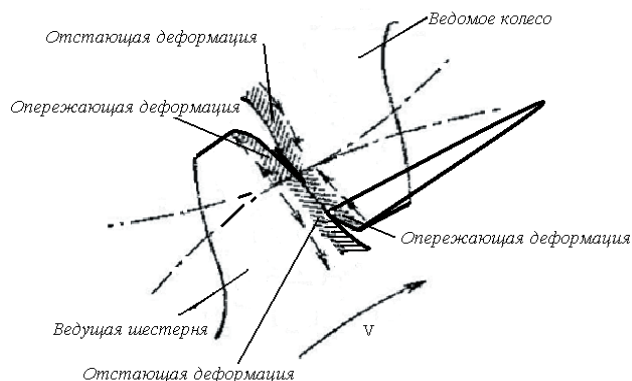


Рис. 2. Схема пластической деформации активных поверхностей зубьев

Отслаивание поверхностных слоев зубьев наблюдается в тех случаях, когда под упрочненным поверхностным слоем величина приведенных контактных напряжений достаточно велика. В результате периодического действия глубинных напряжений под упрочненным слоем могут возникнуть усталостные трещины, развитие которых и приводит к отслаиванию отдельных участков поверхностного упрочненного слоя. Этот вид разрушения наиболее опасен для колес, зубья которых подвергнуты поверхностному упрочнению (цементации, азотированию, поверхностной закалке и т. д.). Возможность появления отслаивания существенно зависит от соотношения толщины

упрочненного слоя и величины приведенного радиуса кривизны соприкасающихся зубьев с учетом геометрических параметров, физико-механических и комплексных параметров их состояния.

Абразивный износ зубьев заключается в истирании активных поверхностей зубьев, существенно зависящем от величины удельного давления, относительной скорости скольжения, состояния активных поверхностей зубьев, возможности попадания в передачу абразивных частиц. Наличие износа вызывает искажение эвольвентного профиля зуба и может привести к существенному ослаблению ножки зуба. Искажение профилей вызывает возрастание динамических нагрузок и напряжений у основания зуба, а также снижение изгибной прочности зубьев.

Существенное влияние на износ оказывает шероховатость рабочих поверхностей зубьев. Если микронеровности на активных поверхностях зубьев превышают толщину масляного слоя, то происходит непосредственное соприкосновение активных поверхностей зубьев. Интенсивный начальный износ носит наименование приработочного износа. По мере сглаживания поверхностей зубьев износ уменьшается и может совсем прекратиться. Продолжительность приработочного износа существенно зависит от твердости активных поверхностей зубьев. Для передач с высокой твердостью этот процесс может быть весьма длительным. В тех случаях, когда износ стабилизируется во времени, он носит название прогрессирующего. Этот износ характерен для открытых зубчатых передач или передач, работающих без смазки, и является основной причиной выхода их из строя.

При проектировании зубчатых передач и для повышения их качества необходимо выполнить комплекс работ по обеспечению системы геометрических параметров: макроотклонения, волнистости, шероховатости, физико-механических и комплексных параметров их состояния поверхности, применение колес с высокой твердостью активных поверхностей зубьев, правильный подбор и осуществление смазки; выбор геометрии зацепления, при которой достигается уменьшение скорости скольжения зубьев с целью предупреждения выхода зубчатых передач из строя.

В зоне контакта, где материал подвергается сильному всестороннему сжатию, возникают пластические деформации зубьев. Силы трения вызывают перемещение поверхностных слоев материала в направлении вектора скорости скольжения. При этом на поверхности ведущих зубьев вблизи полюсной линии образуется впадина, на поверхности ведомых зубьев – выступ (рис. 2), что в значительной степени определяется значением коэффициента трения сопрягаемых эвольвентных поверхностей зубчатых колес и их состоянием.

При заедании зубчатых передач в зоне высоких контактных давлений на больших скоростях скольжения между отдельными участками соприкасающихся поверхностей образуется металлическое соединение – схватывание, основной причиной которого может быть несоответствующее состояние поверхностного слоя. Последующее относительное движение поверхности приводит к разрушению мест соединения. При возрастающих высоких удельных давлениях происходит более интенсивное схватывание и вызываемое им разрушение. При особо неблагоприятных усло-

виях возможно появление значительного числа зон схватывания, что приводит к сильному повреждению контактирующих поверхностей. Заедание различают ограниченное и прогрессирующее. Ограниченное заедание может быть у неприработавшихся передач, возможно и при небольших нагрузках. По мере приработки передачи заедание прекращается, а состояние поверхностей может даже улучшиться. Если же заедание не прекращается, а продолжает развиваться даже при оптимальном контакте зубьев, что приводит к прогрессирующему заеданию. В этом случае вследствие нарушения режима смазки и повышения температуры разрушение активных поверхностей может происходить весьма быстро.

С целью повышения нагрузочной способности, а следовательно, снижения габаритов и массы передачи, целесообразно обеспечить высокую твердость активных поверхностей зубьев с сочетанием равновесного обеспечения поверхностного слоя зубчатых колес. Для этой цели применяются объемная закалка с низким отпуском, поверхностная закалка и химико-термические обработки (цементация, азотирование, цианирование и др.). В этих случаях нарезание зубьев производится до окончательной термообработки, а финишные операции после термообработки.

Цементация зубьев с последующей закалкой дает высокую твердость активных поверхностей их (до $H = \text{HRC } 55-63$) при достаточно вязкой сердцевине зубьев. При этом используются стали с содержанием углерода 0,12–0,3%, например, стали марок 15, 20, 15X, 20XP, 12XНЗ, 12X2Н4А, 12XНЗА, 20XНЗА, 18ХГТ, 18ХНВА, 18ХНЗА, 18ХФ и др. Малоуглеродистые стали марок 15 и 20 применяются редко, поскольку они не обеспечивают достаточную прочность материала и однородный слой цементации. Наибольшую надежность удастся подучить при применении после цементации доводочных операций, например скоростного зубофрезерования, зубошлифования, устраняющих сопутствующие цементации искажения формы зубьев.

Азотирование обеспечивает высокую поверхностную твердость, но полученный твердый слой имеет небольшую толщину, что делает опасным подслоинные разрушения. Азотирование особенно целесообразно в тех случаях, когда после термической обработки не могут быть применены отделочные операции. Для азотированных зубчатых колес обычно применяют стали марок 38ХМЮА, 35ХЮА, 38ХВФЮ, 30ХН2МФА, 45Х2Н2МФЮА и др.

Цианирование также дает высокую поверхностную твердость ($H = \text{HRC } 60-63$), но получаемый твердый слой имеет небольшую толщину. Применяются стали марок 20X, 35X, 40X, 30ХГТ, 20ХГР и др.

Объемной закалке, а также поверхностной закалке с нагревом токами высокой частоты (при малых или средних размерах зубчатых колес) или спреерная закалка подвергаются зубчатые колеса, изготовленные из сталей с содержанием углерода 0,4–0,5%, например из сталей марок 45, 50, 50Г, 40X, 40ХН, 45ХН, 40ХН4А и др. Зубчатые колеса из этих сталей подвергаются термической обработке после нарезания зубьев, причем в качестве окончательной обработки применяется скоростное зубофрезерование и зубошлифование. При осуществлении поверхностной закалки особое внимание следует обращать на режимы закалки и от-

пуска с целью исключения возможности образования закалочных трещин. При объемной закалке с низким отпуском возможны значительные деформации зубьев и, что более существенно, уменьшение усталостной изломной прочности их в связи с хрупкой структурой сердцевины. Это не позволяет рекомендовать объемную закалку для ответственных передач.

Между пределом прочности G_B (МПа) и твердостью H_B или HRC существует приближенная зависимость:

$$G_B \approx 3,5 \cdot H_B \approx 35 \cdot HRC . \quad (1)$$

Совершенствование и повышение качества передач невозможно без надежного способа установления системы геометрических (параметры макроотклонения, волнистости, шероховатости), физико-механических и комплексных параметров их состояния.

Практика эксплуатации зубчатых передач, применяемых в различных машинах, показала, что все передачи работают в условиях неравномерного распределения нагрузки по длине зубьев вследствие наличия макроотклонений, волнистости, шероховатости, отклонения от параметров точности изготовления по нормам кинематической точности, нормам плавности и нормам бокового зазора.

В одних случаях такая неравномерность распределения нагрузки по длине зубьев является причиной серьезных повреждений передач и выхода их из строя, а в других – причиной пониженной долговечности передач [3 – 7].

В результате неравномерного распределения нагрузки в зацеплении зубья часто ломаются, особенно если твердость их поверхности выше $H_B 350$ [2].

Поломки зубьев колес различных передач, возникающие при чрезмерной концентрации нагрузки, характеризуются наклонным расположением поверхности излома. Угол наклона поверхности излома возрастает с увеличением неравномерности распределения нагрузки вдоль зубьев.

Следствием концентрации нагрузки являются также контактные разрушения твердых рабочих поверхностей зубьев вблизи торцов колес. Встречается расположение очагов выкрашивания и в средней части зубьев, если имеет место перекося колес в плоскости, перпендикулярной к их оси [3, 8, 9].

Иногда возникшее из-за концентрации нагрузки выкрашивание рабочей поверхности зубьев служит причиной их поломки.

Несмотря на то, что при расчете зубьев на предупреждение излома модуль передачи был вполне достаточным, лунки выкрашивания, образовавшиеся из-за перегрузки части зуба по его длине, стали значительными концентраторами напряжений. В зоне этих концентраторов зародились трещины, которые затем развились и привели к поломке зубьев.

В тоже время, такая задача потребует предъявления к закаленным крупномодульным зубчатым колесам повышенных требований в части их эксплуатационных свойств. Причем эти требования распространяются как на уровень (диапазон) этих свойств, так и на их количество.

Поэтому все вышперечисленное требует введения не только изменения к подходу в области регламента-

ции качества поверхностей инструментов, но и ставят задачу многокритериальной системной оптимизации.

2. Цель исследований

Целью работы является изучение системы комплексных параметров, применяемых при технологическом обеспечении эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес, систематизация методов технологического моделирования при помощи комплексных параметров состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес, их системный анализ и результаты экспериментальных исследований.

3. Основная часть

Из множества эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес, как объекта технологического исследования при обеспечении их эксплуатационных свойств наиболее ярко выделяются такие как – поломка зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание.

В теории технологического обеспечения эксплуатационных свойств, согласно классической схеме, принято регламентировать определенный набор параметров качества поверхностей. Этот аспект детально рассмотрен в работах, таких ученых как, И.В. Крагельский, В.С. Комбалов, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов и др. [1, 3, 4].

Классическая схема решения этой задачи хорошо себя зарекомендовала при обеспечении малого ограниченного набора свойств, как например одного или двух-трех. Хотя выше перечисленные авторы и учитывают физику процессов эксплуатации при назначении данной системы параметров через эти ограниченные наборы, пусть и частично, но не решают рассматриваемую задачу при обеспечении большого числа эксплуатационных свойств.

Принято считать, что комплексный параметр, учитывая физическую картину эксплуатации, например трения и износа, считается безразмерной величиной и включает в себя те параметры качества поверхности, которые оказывают основное влияние на процесс эксплуатации.

При решении рассматриваемой задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых передач применяются комплексные параметры.

Поэтому, выделяется два вида таких параметров – технологические и расчетно-конструкторские. Их формальные значения выводятся из условий эксплуатации [2, 4].

Считается, что для технологического обеспечения эксплуатационных свойств закаленных поверхностей зубчатых колес, необходимо, чтобы конструкторско-расчетное значение параметра было меньше, либо равным, его технологическому значению. Это условие положено в разработанную методику моделирования.

Единого комплексного параметра состояния поверхности, характеризующего все эксплуатационные свойства одновременно, не существует, хотя в научных

публикациях [2] говорится о такой необходимости, это объясняется несовершенством методик их получения. Авторы работы [3, 6] применяют для обеспечения двух и более эксплуатационных свойств регрессионно-статистический анализ при многокритериальной регламентации параметров качества поверхности. Но использовать его для этих целей весьма сложно.

Поэтому, используя системную оптимизацию, можно найти, для заданной поверхности, с предъявленной к ней системой эксплуатационных свойств, для заданных методов обработки, области, которые будут характеризовать достижение ограниченного набора этих свойств.

Следовательно для того чтобы, обеспечить большой ограниченный набор различных эксплуатационных свойств соответствующими методами обработки необходимо рассматривать комплексные параметры в качестве функций эксплуатации, включающие параметры шероховатости, волнистости, макроотклонений, физико-механических свойств для совершенствования и повышения качества зубчатых передач и колес.

Комплексные параметры, в свою очередь, не являются статическими величинами, а изменяются при эксплуатации, не зависят от исходной шероховатости поверхности. При этом принимается, что они являются безразмерными комплексами. При снижении расчетно-конструкторского значения комплексного параметра D (долговечности) с 0,20 до 0,04 ед. число выходов из строя передач в результате поломки зубьев и повреждений их рабочих поверхностей, вызванных выкрашиванием, износом, заеданием снизилось с 16% до 6% [6, 10].

Эти повреждения возникают в различных местах поверхностей зубьев вследствие концентрации нагрузки, обусловленной неравномерным распределением ее вдоль контактных линий.

В зоне контакта, где материал подвергается сильному всестороннему сжатию, возникают пластические деформации зубьев. Силы трения вызывают перемещение поверхностных слоев материала в направлении вектора скорости скольжения. При этом на поверхности ведущих зубьев вблизи полюсной линии образуется впадина, на поверхности ведомых зубьев – выступ, что в значительной степени определяется значением коэффициента трения сопрягаемых эвольвентных поверхностей зубчатых колес.

В тоже время при уменьшении значения параметра Π (несущей способности) с 0,05 до 0,016 ед. соответственно и регламентируемом параметре шероховатости $Ra = 1,6$ мкм (среднее арифметическое отклонение профиля), привело к снижению коэффициента трения в 1,35 раза.

А также, при снижении комплексного параметра I (равномерного износа) с 7 до 3 ед. соответственно и регламентируемом параметре качества $Hr = 2,5$ мкм (высота сглаживания макроотклонений), величина линейного смещения вершины зуба колеса снизится с 0,05 до 0,01 мм [3].

По сравнению с традиционной методикой регламентацией качества поверхностей закаленных зубчатых колес регламентация при помощи комплексных параметров их состояния позволяет добиться снижение шумовых характеристик (5 ÷ 10)%, повышению плавности в соответствии с регламентом параметров норм плавности ГОСТ 1643-81, повышения долговечности зубчатых колес, износостойкости.

Все приведенные выше рассуждения свидетельствуют о том, что регламентацию состояния поверхностей зубчатых колес, при обеспечении их эксплуатационных свойств, следует проводить с применением комплексных параметров их состояния на основе рассмотренных далее методов моделирования.

С разделением комплексных параметров на технологические и расчетно-конструкторские, возникает задача упрощения регламентации, единства подхода и снижения вероятности ошибок технологических решений.

Один из вариантов такого решения это применение графических методов системной оптимизации.

При таком двухступенчатом технологическом обеспечении, где, разделены задачи конструктора и технолога, критериями по определению метода обработки на финишном этапе, а также и режимов резания, являются необходимые условия максимума площадей эффективного значения эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки ОЭМО (СОЭМО), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах качества поверхности.

На рис. 3 показано, что в пределах одного этапа обработки, в зависимости от выбранного метода, как например – чистовое зубофрезерование червячной модульной фрезой, зубошлифование и скоростное зубофрезерование немодульными дисковыми фрезами, вероятность обеспечения заданного эксплуатационного свойства составляет 66% и 46% соответственно (Комплексный параметр K_x). Где, ОДМО – область достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область D); ОРЭС – область регламентируемых значений эксплуатационных свойств (область P); ОЭМО – область эффективных значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область A); R_{ai} – регламентируемый параметр качества поверхности; K_x – регламентируемый комплексный параметр при обеспечении заданного эксплуатационного свойства.

Это однозначно говорит о приоритете скоростного зубофрезерования немодульными дисковыми фрезами (рис. 4) над всеми остальными рассмотренными методами обработки при обеспечении эксплуатационных свойств – исключения поломки зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание, при отвлечении от учета затрат.

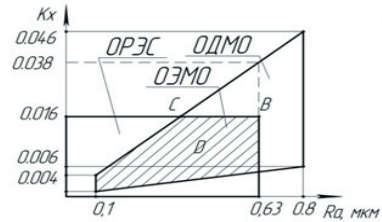


Рис. 3. Схема выбора метода зубообработки, где показана зависимость регламентируемого комплексного параметра при обеспечении заданного эксплуатационного свойства K_x от регламентируемого параметра качества поверхности R_{ai}

При невыполнении одного или нескольких из этих условий, следует либо сменить метод обработки на финишном этапе технологического процесса, либо сменить регламентируемые параметры качества поверхности, либо увеличить число этапов обработки поверхности.

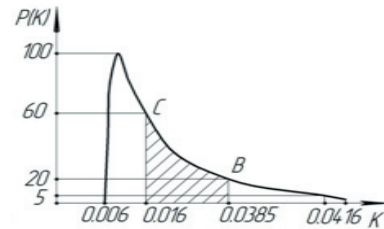


Рис. 4. Функция плотности вероятности $\Phi(K_x)$ при скоростном зубофрезеровании с обеспечением эксплуатационного свойства, где $P(K)$ безразмерная величина от 0 до 100 зависит от K значением от 0,006 до 0,0416

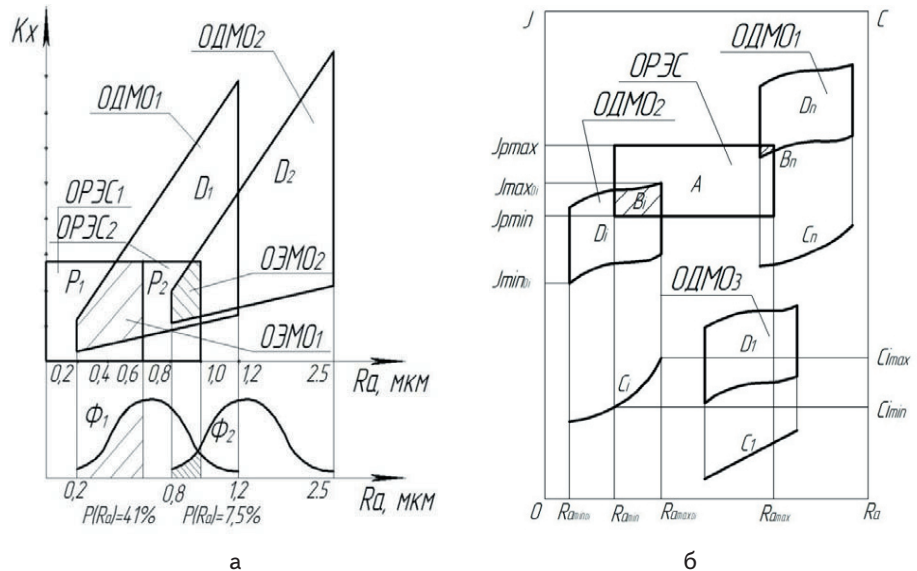


Рис. 5. Замена метода обработки при обеспечении заданного эксплуатационного свойства в случае: а – неудовлетворительного значения плотности вероятности $P(R_{ai})$; б – неудовлетворительной величине затрат C^{**}

Примечание: * – площадь и положение области ОЭМО; определяют значение плотности распределения комплексного параметра состояния поверхности K_x ; ** – площадь и положение пересечения областей ОРЭС и ОДМО, в проекции на функцию C_i определяют диапазон затрат при обеспечении эксплуатационных свойств поверхности

Если же это не дало желаемого результата, то можно, пересмотреть перечень регламентируемых эксплуатационных свойств и выбрать из них те, которые являются доминирующими для рассматриваемых условий эксплуатации (рис. 5).

Рассматривая рис. 4 и рис. 6 можно сказать, что выходной информацией конструктора и в тоже время исходными данными для технолога служит область регламентируемых значений эксплуатационных свойств ОРЭС (ЦОРЭС). Эта область включает все эксплуатационные свойства, которые конструктор задает технологу.

А значение этой области не зависит от, тех, которые достигнуты технологически, процесс же моделирования, заключается в установлении наложений областей достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки ОДМО (СОДМО) и рассмотренной выше областью (ЦОРЭС).

Где СОДМО – совместная область достижимых значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе обработки (область В); ЦОРЭС – целевая область регламентируемых значений эксплуатационных свойств (область Р); СОЭМО – совместная область эффективных значений эксплуатационных свойств при рассматриваемом методе зубообработки (область А).

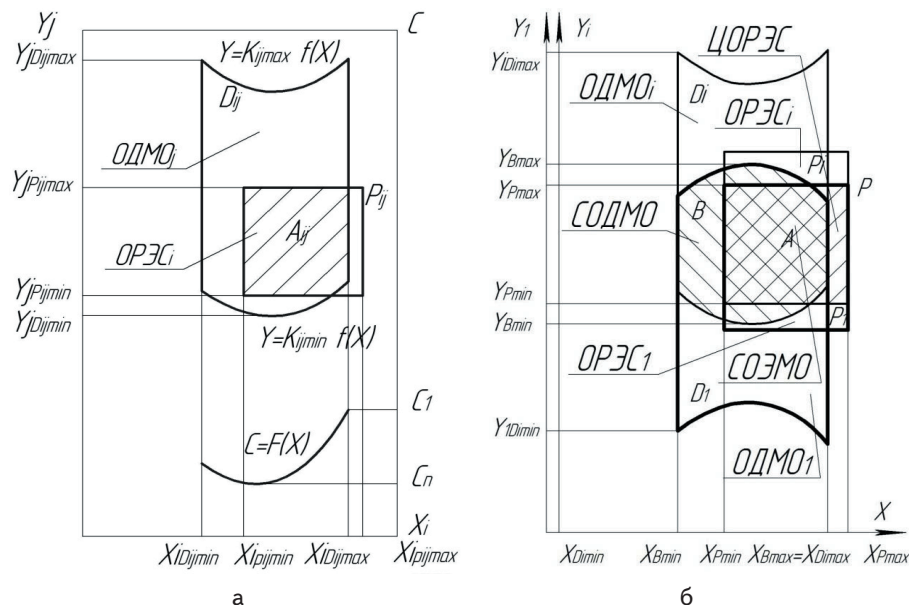


Рис. 6. Графическая схема выбора метода обработки при обеспечении: а – одного эксплуатационного свойства и оптимальной величины затрат C_i^* ; б – нескольких эксплуатационных свойств**

Примечание: * – величина издержек при рассматриваемом методе обработки зависит от проекции границ области A_{ij} на функцию затрат; ** – область ЦОРЭС включает все эксплуатационные свойства заданные для обеспечения, ее пересечение с областью СОДМО определит размер площади области СОЭМО и ограничит диапазон параметров поверхностного слоя, необходимых для технологического обеспечения

В тоже время, ограничением возможности применения данного моделирования является следующее: область ОРЭС (ЦОРЭС) ограничена возможностями разработчика и назначение любого значения регламентации внутри нее является величиной равновероятной, а также для ряда эксплуатационных свойств зубчатых колес - исключения поломки зубьев, выкра-

шивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание имеют не постоянную площадь контакта, для которых выделить период нормального износа сложно. Это говорит о невозможности построить область ОРЭС (ЦОРЭС), т.к. комплексный параметр будет постоянно изменяться в процессе эксплуатации.

Поэтому к эвольвентным поверхностям контактного взаимодействия закаленных зубчатых колес предъявляются повышенные требования в части как уровня, так и числа регламентируемых эксплуатационных свойств.

Для рассмотрения технологических параметров формообразования эвольвентной поверхности зубчатого с целью обеспечения эксплуатационных свойств, применяем теорию системно-структурного анализа [2], позволяющую не только построить схемы с выявлением эксплуатационных свойств зубчатых колес, но и обеспечить эксплуатационные свойства в соответствии с назначением условий эксплуатации зубчатой пары.

Разработанная теория технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных зубчатых колес были внедрены на ПАО «НКМЗ», ООО «КЗМО».

Данные исследования закаленных зубчатых колес подтвердили обоснованность регламентации состояния их поверхностей при помощи комплексных параметров долговечности Д, равномерного износа И, несущей способности П и других.

4. Выводы

Проведенное исследование показало, что для закаленных зубчатых колес, такие их показатели, как поломка зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание при одних и тех же регламентируемых параметрах качества поверхностей закаленных зубчатых колес, имели меньшую дисперсию рассеяния, чем при использовании традиционной методики регламентации состояния их поверхностей.

Также введение моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных зубчатых колес при помощи системной оптимизации, позволяет в процессе разработки технологических процессов наиболее полно использовать возможности методов их обработки.

Література

1. Рыжов, Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин [Текст] / Э. В. Рыжов. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 272 с.
2. Кравцов, Н. В. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н. В. Кравцов, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко и др.; науч. ред. А. А. Пермяков; общ. ред. Ю.М. Соломенцев // Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении. – ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012. – 254 с. – ISBN 59903090-6-7.
3. Суслон, А. Г. Инженерия поверхностей деталей [Текст] / колл. авт.; под ред. А. Г. Суслон. – М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.
4. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.
5. Okteta, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness [Text] / H. Okteta, T. Erzurumlu and H. Kurtaran // J. Mater. processing Technol, 2005. – Vol. 170. – pp. 11–16.
6. Кравцов, А. Н. Обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей при изготовлении [Текст] / А. Н. Кравцов, Н. В. Кравцов; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС». – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 261 с.
7. Thomas, T. R. Rough Surfaces [Text] / T. R. Thomas. – 2nd ed. – Imperial College Press. – London, 1999.
8. Wyko Corporation. Surface Profiles: Technical reference manual [Text] / Wyko Corporation. – Tucson, AZ, USA. – 1996.
9. Lou, M. S. Inprocess surface roughness recognition system in end-milling operations [Text] / M. S. Lou, J. C. Chen // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – Vol.15. – pp. 200-209.
10. Alauddin, M. Optimization of surface finish in end milling Inconel 718 [Text] / M. Alauddin, M. A. El Baradie, M. S. J. Hashmi // J. Mat. Proc. – 1996. – Vol. 56. – pp. 54–65.

У статті проаналізовано розподіл внутрішніх та реактивних зусиль при моделюванні згину композитних брусів за ітераційною зсувною моделлю. Визначено характер впливу зсувної піддатливості матеріалу бруса на форму і величину внутрішніх зусиль. Подані результати теоретичних і експериментальних досліджень реактивних зусиль у статично невизначених балках

Ключові слова: внутрішнє зусилля, реактивне зусилля, згин, композит, брус, зсув, ітерація

В статье проанализировано распределение внутренних и реактивных усилий при моделировании изгиба композитных брусьев с использованием итерационной сдвиговой модели. Определен характер влияния сдвиговой податливости материала бруса на форму и величину внутренних усилий. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований реактивных усилий в статически неопределенных балках

Ключевые слова: внутреннее усилие, реактивное усилие, изгиб, композит, брус, сдвиг, итерация

УДК 539.3+681.3.06

РОЗПОДІЛ ВНУТРІШНІХ ТА РЕАКТИВНИХ ЗУСИЛЬ ПРИ ЗГІНІ КОМПОЗИТНИХ БРУСІВ

С. Б. Ковальчук

Асистент

Кафедра загальнотехнічних дисциплін
Полтавська державна аграрна академія
вул. Сковороди, 1/3, м. Полтава, Україна,
36003

E-mail: staskb@rambler.ru

1. Вступ

Підвищення надійності та економічності нових інженерних конструкцій потребує застосування композитних матеріалів, які за своїми цільовими характеристиками значно перевершують традиційні однорідні матеріали.

У конструкціях різного призначення широко роз-

повсюдені елементи у вигляді брусів, що працюють на поперечний згин.

Ефективне застосування композитних матеріалів для виготовлення таких елементів потребує розробки теоретичних передумов та практичних методів розрахунку, які дозволяють враховувати неоднорідність композитів та їх особливості деформування, зокрема значну піддатливість дії поперечних зсувів.