

1594

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

МИКОВ Ирий Геннадьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТей ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
ЗУБОХОНИГОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 - "Технология
машиностроения"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Челябинск
1978

ЧПИ

«ГИ ТУСУР»

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор КОРЧАК С.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент БУТОРИН Г.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук ФРАГИН И.В.,
кандидат технических наук ГУРГАЛЬ В.И.

Ведущее предприятие - ЧЕЛЯБИНСКИЙ ТРАКТОРНЫЙ ЗАВОД им. В.И. ЛЕНИНА.

Защита состоится "22" февраля 1978г., в 15 часов, в аудитории 244 на заседании специализированного совета К-597/1 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола (454044, Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76, Челябинский политехнический институт).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "19" января 1978г.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять в специализированный совет К-597/1 по адресу: 454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И. Ленина, 76, ЧПИ.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук, доцент

(В.М.МЕНЬШАКОВ)



Актуальность работы. В машиностроении зубчатые колеса являются весьма распространенными деталями. По статистическим данным в Советском Союзе ежедневно выпускается более миллиона зубчатых колес только средних модулей. Нормальная работа большинства машин, механизмов и приборов определяется надежностью и качеством работы зубчатых зацеплений. Даже небольшое повышение надежности и увеличение сроков эксплуатации их имеет значительный народнохозяйственный эффект.

Важными показателями качества зубчатых колес, определяющими их эксплуатационные характеристики, являются размерная и геометрическая точность изготовления, а также шероховатость рабочих поверхностей зубьев. Большое значение при обеспечении этих показателей имеют способы окончательной обработки зубчатых колес. Наиболее прогрессивным среди них следует признать зубохонингование, в результате применения которого на 2-3 раза уменьшается шероховатость рабочих поверхностей зубьев, удаляются мелкие забоины и заусенцы, улучшаются точностные показатели зубчатых колес.

Большие перспективы для внедрения этого процесса в промышленность открывает создание и освоение серийного производства алмазных зубчатых хонов на Львовском заводе алмазного инструмента. Этот инструмент обладает высокой износостойкостью и прочностью зубьев, не теряет своих свойств в процессе эксплуатации. Однако, применение алмазного зубохонингования в настоящее время нельзя признать широким, что объясняется в первую очередь как недостаточной изученностью технологических возможностей процесса, так и отсутствием научно обоснованных нормативов режимов резания.

Поэтому вопросы исследования технологических возможностей процесса алмазного зубохонингования и создания научно обоснованных рекомендаций по выбору режимов и наладке операций являются актуальными.

Многофакторность процесса зубохонингования предопределяет много вариантность возможных решений при установлении рациональных условий его осуществления. Максимальный эффект можно получить только при оптимизации режимов зубохонингования.

Цель работы. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование технологических возможностей процесса алмазного зубохонингования закаленных зубчатых колес и оптимизация на этой базе режимов резания.

Основные задачи. Для достижения поставленной цели необходимо установить взаимосвязь параметров процесса (режимов резания, характеристики инструмента, геометрии детали и др.) с его технико-экономическими показателями, т.е. построить математическую модель процесса зубохонингования, и на этой основе провести его оптимизацию. Поэтому были поставлены следующие основные задачи.

1. Установление минимально необходимого количества и состава технологических ограничений процесса зубохонингования.

2. Исследование технологических ограничений, предусматривающее установление функциональных зависимостей между технологическими условиями процесса и его технико-экономическими показателями.

3. Выбор критерия оптимальности, установление структуры критерия оптимальности, разработка метода оптимизации модели процесса и решение оптимизационной задачи.

4. Разработка рекомендаций по режимам резания и наладке операций зубохонингования.

5. Производственные испытания и внедрение процессов алмазного зубохонингования на заводах с исследованием степени повышения точности обрабатываемых зубчатых колес.

Общая методика выполнения работы. При оптимизации процесса зубохонингования использован, принятый в настоящее время, системный подход к решению подобных задач, который в качестве модели применяет систему неравенств, каждое из которых описывает то или иное требование (ограничение) к процессу.

Определение необходимых зависимостей осуществлялось на базе экспериментальных и теоретических исследований. Экспериментальные исследования проводились непосредственно в производственных условиях Новосибирского механического завода при обработке зубчатых колес $m = 4$ мм, $Z = 12$, $b = 40$ мм, $\beta = 0^\circ$ из стали 40Х

HRC 56 на модернизированном зубомашиноградальном станке мод.5714, а также Уральского автомобильного завода при обработке зубчатых колес $m = 5$ мм и $m = 6$ мм, $Z = 12 \dots 48$, $b = 48 \dots 76$ мм, $\beta = 19^\circ 28' 47''$ и $\beta = 20^\circ$ из стали 12Х2Н4А и 18ХТ. HRC 56...62 на зубохонинговальном станке мод.5Б91З. В качестве инструмента использовались алмазные зубчатые хони Львовского завода алмазного инструмента с характеристиками: $m = 4; 5; 6$ мм; $Z = 53; 43; 37$; $\beta = 15^\circ$ и 0° ; марка алмазного порошка - АСР с зернистостью 40/28...100/80,

концентраций 100%. Учитывая известные преимущества работы этих инструментов по однопрофильной схеме зацепления, при исследований использовалась только эта схема. Для сокращения числа опытов применялись статистические методы планирования экспериментов. Теоретические исследования проводились на базе основных положений теории зацепления.

Построенная в результате исследований математическая модель процесса явилась основой его оптимизации. Нелинейность сформированной при этом оптимизационной системы определила необходимость исследования целевой функции с целью отыскания рационального метода решения оптимизационной задачи.

Научная новизна. Впервые поставлена задача оптимизации процесса зубохонингования, которая решена на основе построения его математической модели.

Применительно к решению этой задачи показано, что характер влияния режимов резания на интенсивность съема металла и стойкость хонов при зубохонинговании качественно не зависит от геометрических параметров детали и инструмента, получено математическое описание этого влияния.

Установлено, что функция цели при зубохонинговании является свражной монотонно убывающей по подаче. Разработан алгоритм решения оптимизационной задачи для такой функции.

Практическая ценность и реализация работы. Установлены оптимальные режимы зубохонингования, которые позволяют наиболее эффективно использовать возможности алмазных зубчатых хонов. В итоге разработаны нормативы по выбору режимов и наладке операций зубохонингования, которые прошли апробацию на ряде заводов и впервые включены отдельным разделом в третье издание справочника "Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках", изданного Центральным бюро нормативов по труду при НИИТруда в 1977г. Процесс алмазного зубохонингования внедрен на Новоятском механическом заводе с экономическим эффектом 51,7 тыс.руб. и принят к внедрению на Уральском автомобильном заводе для обработки шестерен раздаточной коробки автомобиля "Урал".

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации демонстрировались:

1. На XXVIII, XXIX, XXX научно-технических конференциях в Челябин-

ском политехническом институте им. Ленинского комсомола с 1975 по 1977 г.г.

2. На международном семинаре "Прогрессивные методы шлифования". Челябинск, 1976 г.

3. На первой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Челябинского политехнического института, 21-26 февраля 1977 г.

4. На семинаре "Повышение качества производства и технология изготовления редукторов общего назначения". Киев, 1977 г.

5. На Всесоюзной конференции "Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве". Киев, 1977 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Объем работы, ее структура. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста; состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Библиография содержит 99 наименований. В диссертации имеется 72 иллюстрации, 28 таблиц, 2 нормативные карты и одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Состояние вопроса

В последние годы в качестве финишной операции при изготовлении стальных зубчатых колес, подвергаемых термической или химико-термической обработке, находит применение абразивное зубохонингование.

Успешному освоению этого процесса способствовали работы Г.И. Еуторина, А.И. Волчкова, З.Л. Идановой, Н.С. Калашникова, В.Д. Клепикова, Е.Ф. Кожемякина, В.И. Корзинкина, М.Ф. Корыtko, Н.И. Маржине, Н.С. Новикова, И.В. Орлова, В.Ф. Романова, Ю.Н. Сухорукова, Ю.П. Тарамыкина, И.Е. Фрагана, В.А. Фадишина и других исследователей. Работы этих авторов показали, что данный процесс применяется, в основном, для улучшения микрогеометрии боковых поверхностей зубьев, удаления с рабочих поверхностей забоин, заусенцев, а также исправления небольших погрешностей геометрических параметров зубчатых венцов, вызванных термической обработкой.

Низкая прочность, а также недостаточная размерная стойкость и режущая способность используемых для этого вида отделки абразивных зубчатых хонов на полимерных связках явились предпосылкой для разработки и появления в настоящее время более прогрессивного метода скончательной обработки закаленных зубчатых колес - алмазного зубохонингования (зубохонингования алмазными зубчатыми хонами).

Алмазные зубчатые хонь, большая заслуга в создании и освоении промышленного выпуска которых принадлежит В.И.Гургаль, В.В.Завишу, А.В.Куришку, М.З.Мильштейну, по известным примерам эксплуатации обладают высокой износостойкостью и прочностью зубьев, не засаливаются во время работы и не теряют своих режущих свойств. Процесс алмазного зубохонингования отличается большой производительностью и вполне может применяться в массовом и крупносерийном производстве.

Однако, несмотря на отмеченные достоинства, этот метод обработки зубчатых колес в практике находит еще ограниченное применение.Происходит это по двум причинам. Во-первых, недооценивается влияние обработки зубьев хонингованием на эксплуатационные характеристики зубчатых колес, что объясняется недостаточной изученностью этого вопроса. Во-вторых, внедрение алмазного зубохонингования, как правило, сопряжено с определенными трудностями.Эти трудности связаны с отсутствием достаточно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных режимов резания и наладке этих операций, что в свою очередь объясняется малой изученностью самого процесса.

Имеющиеся в литературе данные носят, в своем большинстве, описательный характер и относятся в основном к зубчатым колесам узкого диапазона типоразмеров. Известные же теоретические исследования не позволяют устанавливать более общие связи между требованиями, предъявляемыми к процессу, и его параметрами, так как они ограничиваются в большинстве случаев рассмотрением частных задач.

Заводам, внедряющим процесс алмазного зубохонингования, приходится устанавливать режимы резания экспериментально, что не гарантирует приятия оптимальных решений, обеспечивающих высокую эффективность процесса.

2. Теоретические предпосылки

Как показывает анализ практического использования абразивного алмазного зубохонингования на заводах, применяемые режимы отличаются большим разнообразием. Колебание по отдельным параметрам режимов достигает до 5-6 раз. Приведенные расхождения объясняются особенностями инструментов, применяемых в тех или иных случаях, различием размеров и материалов обрабатываемых зубчатых колес, твердостью, на которую они термообработаны и т.д. Но одной из основных причин является многогранность процесса и, как следствие, многовариантность принятий возможных решений.Примерно одинаковые конечные результаты могут быть достигнуты различным соче-

тением факторов процесса: режимов резания, геометрии инструмента и т.д. Выбор наилучшего варианта обработки при этом представляет сложную технико-экономическую задачу, решить которую возможно только на основе оптимизации режимов резания данного процесса.

Оптимизация режимов резания является одной из основных конкретных задач при проектировании технологических процессов механической обработки. Решаются эти задачи в настоящее время методами математического программирования, которые впервые у нас в стране стали применять А.М.Гильман, Г.К.Горянский и некоторые другие исследователи. Использование этих методов позволяет сократить время поиска, а также выбрать и обосновать принятное оптимальное решение при условии, что математическая модель, положенная в основу расчета, с достаточной достоверностью отражает моделируемое явление.

При этом оптимизация режимов сводится к решению задачи на условий экстремум функции $F(z)$ (критерия оптимальности), выражющую зависимость показателя эффективности процесса от режимов

$$F(z^*) = \min \{F(z) : z \in M; z^* \in M\}, \quad (1)$$

где Z – вектор параметра режима $Z = (Z_1, \dots, Z_n)$,

Z^* – вектор оптимального параметра,

M – множество допустимых режимов.

Множество допустимых режимов обусловлено характеристикой оборудования и инструмента, требованиями к перековатости и точности обработки и задается с помощью системы условий (технологических ограничений)

$$M = \{z : z_l \geq 0; y_j(z) \leq C_j (l=1, \dots, n; j=1, \dots, m)\} \quad (2)$$

где $y_j(z)$ – зависимость периода стойкости, мощности резания, перековатости и др.;

C_j – требуемые или допустимые значения соответствующих параметров.

Совокупность уравнений и неравенств (2), отображающих различные закономерности, присущие реальному процессу, и образуют математическую модель технологического процесса, которая может быть решена методами математического программирования.

Таким образом, наиболее полно поставленным требованиям выбора наивыгоднейших режимов резания отвечает метод математического моделирования, позволяющий заменить сложное и трудоемкое экспериментирование этих процессов исследованием их математических моделей с целью оптимизации параметров обработки.

То есть проблема создания научно обоснованных рекомендаций по выбору режимов и наладке операций алмазного зубохонингования может быть решена в более полном объеме только на основе оптимизации процесса, для чего ниже строится его адекватная математическая модель.

3. Анализ взаимосвязи технологических факторов и построение математической модели процесса зубохонингования

При определении оптимальных параметров режима алмазного зубохонингования необходимо учитывать тот факт, что процесс происходит в реальных конкретных условиях, которые накладывают на него определенные ограничения. Технологические ограничения, в совокупности составляющие математическую модель процесса, представляют собой функциональные связи между параметрами и показателями процесса зубохонингования.

Наиболее важными ограничениями, характеризующими процесс алмазного зубохонингования, являются: мощность электропривода главного движения станка; заданная производительность станка; наименьшая и наибольшая скорость резания и подача, допускаемые кинематикой станка; наименьшее и наибольшее усилие нагружения, возможное по станку; требуемая шероховатость обработанной поверхности; требуемый съем припуска.

Для возможности использования данной модели при определении оптимальных режимов потребовалось выявить следующие функциональные связи между параметрами и показателями процесса:

- а) установить влияние параметров режима и характеристики инструмента на шероховатость обработанной поверхности;
- б) установить влияние величины снимаемого припуска на исправляющую способность процесса зубохонингования;
- в) установить влияние параметров процесса на съем металла и стойкость зубчатых хонов.

При установлении взаимосвязи различных факторов с шероховатостью обработанной поверхности рассматривалось влияние на нее вида применяемых СОЖ, параметров режима резания (окружной скорости хона - P_x , подачи инструмента на оборот детали - S_0 , окружного нагружения - P_0), зернистости алмазных зубчатых хонов.

Наилучшие результаты среди исследуемых СОЖ (использовались водные растворы электролитов, эмульсии, масла) показало веретенное масло, которое было рекомендовано к применению при алмазном зубохонинговании.

Как показали исследования, параметры режима резания практически заметного влияния на шероховатость не оказывают.

Наиболее существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает зернистость применяемого в хонах алмазного порошка. На базе исследований разработаны рекомендации по выбору зернистости алмазных зубчатых хонов (табл. I).

Таблица I
Рекомендуемая зернистость алмазного зубчатого хона

Требуемая шероховатость, мкм	$R_a \leq 2,5$	$R_a \leq 1,25$	$R_a \leq 0,63$
Номер зернистости	100/80; 80/63	63/50; 50/40	40/28

Большой практический интерес при алмазном зубохонинговании представляет определение оптимальной величины снимаемого припуска. Снятие малых припусков не дает возможности получить ожидаемого результата, необоснованное же их завышение повлечет увеличение трудоемкости обработки и, кроме того, может привести к ухудшению геометрии обрабатываемых колес.

Для определения влияния величины снимаемого припуска на исправляющую способность процесса у зубчатых колес, обработанных со снятием разных припусков, до обработки и после нее замерялись погрешность профиля, погрешность напряжения зубьев и колебание измерительного междулевого расстояния (ИМР) за оборот колеса. Как показали эксперименты припуск больше 0,01 мм на толщину зуба дает возможность снять большую часть дефектного слоя, причем с ростом снятого припуска одни из погрешностей геометрической формы исправляются все в большей степени (колебания ИМР, погрешность направления зубьев), другие (погрешность профиля) имеют максимальное исправление при определенной величине припуска. Оптимальной величиной снимаемого припуска, обеспечивающей полную обработку зуба и позволяющей получить наибольшее исправление погрешностей зубчатого венца обрабатываемых шестерен, является - 0,015...0,02 мм. При этом параметры режимов резания практически не влияют на исправляющую способность процесса.

Интенсивность съема металла и стойкость хонов при зубохонинговании определяется большим числом факторов (параметрами режима резания, геометрией детали и инструмента и др.). В общем виде эти зависимости можно записать так:

$$Y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \quad (3)$$

где Y - показатель процесса (съем металла, стойкость хона).

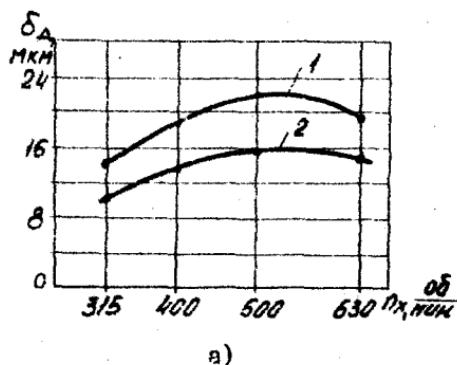
На основе опыта практического использования абразивного и алмазного зубохонингования была выдвинута гипотеза о независимости влияния параметров режима резания и геометрических параметров детали и инструмента на характер зависимости (3), то есть

$$Y = f_1(Z_i) \cdot f_2(Z_j), \quad (4)$$

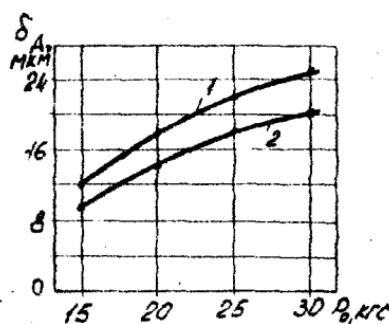
где Z_i - параметры режима резания,

Z_j - геометрические параметры детали и инструмента.

Экспериментальные исследования по определению влияния отдельных параметров режима резания на съем металла при обработке отличающихся по геометрии зубчатых колес (рис. I) подтверждают это предположение.



a)



b)

Рис. I. Влияние окружной скорости (а) и нагружения (б) на съем припуска:

1. Деталь: $m = 5\text{мм}$, $z = 33$, $\beta = 19^{\circ}28'47''$; хон: $\beta = 0^{\circ}$; АСР 63/50;
2. Деталь: $m = 4\text{мм}$, $z = 12$, $\beta = 0^{\circ}$; хон: $\beta = 15^{\circ}$; АСР 63/50

Исходя из этого, при установлении зависимостей, связанных стойкостью инструмента и скорость съема припуска с параметрами режима резания, осуществлялось экспериментальное их определение на базе конкретных зубчатых колес, а перенос и переработка этих данных для других размеров колес осуществлялась на базе аналитического исследования по определению влияния геометрических параметров зубчатых колес на характер полученных зависимостей.

Для сокращения объема экспериментальных исследований были использованы статистические методы планирования экспериментов. Учитывая, что по данным предварительных исследований окружная скорость хона оказывает на показатели процесса влияние, которое не может быть описано линейно даже в логарифмических координатах (рис. Iа), искомые зависимости устанавливались при ряде фиксированных значениях окружной скорости с последующим обобщением результатов.

Непосредственное определение стойкостных зависимостей из-за большой стойкости алмазных зубчатых хонов практически затруднено, поэтому, бера во внимание, что по данным И.В.Орлова, В.И.Гургала и др. как при абразивном, так и при алмазном зубохонинговании она связана линейно с износом хонов, в качестве выходных параметров (откликов) процесса определились:

δ_d - средний линейный съем с детали за время одного двойного хода инструмента, мкм;

δ_x - линейный износ хонов за время обработки партии деталей, мкм.

На основе априорной информации о характере искомых зависимостей они были аппроксимированы уравнением первой степени с взаимодействием факторов

$$\hat{y} = \delta_0 + \delta_1 \cdot \hat{x}_1 + \delta_2 \cdot \hat{x}_2 + \delta_{12} \cdot \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2, \quad (5)$$

где \hat{y} - значение выходных параметров δ_d и δ_x в логарифическом масштабе;

\hat{x}_1, \hat{x}_2 - логарифмы соответственно S_o и P_o ;

$\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_{12}$ - коэффициенты уравнения.

Для определения коэффициентов уравнения (5) осуществлялась постановка полного факторного эксперимента типа 2^2 при следующих значениях окружных скоростей инструмента: $\omega_{x_1} = 250$ об/мин, $\omega_{x_2} = 400$ об/мин, $\omega_{x_3} = 500$ об/мин, $\omega_{x_4} = 630$ об/мин.

Исследования проводились при обработке зубчатых колес с параметрами: $m = 5$ мм, $z = 27$, $\beta = 19^{\circ}28'47''$, $b = 50$ мм алмазными

зубчатыми хонами АЗХ-5-20⁰-0⁰-АСР 63/50-100%, которые обеспечивают шароховатость поверхности $R_a = 1,25 \text{ мкм}$ (табл. I), что в настоящее время в большинстве случаев удовлетворяет требованиям по этому параметру для зубчатых колес автомобилей, тракторов и других изделий.

После математической обработки данных, полученных при экспериментах, с учетом замены кодированных переменных величин натуральными факторами и потенцирования, пришли к уравнениям:

$$\delta_x = \frac{P_0^{0.9}}{S_0^{0.6} \cdot (a n_x^2 + b n_x + c)}, \quad (a) \quad \delta_x = \frac{0.0102 \cdot n_x^{0.5} \cdot P_0^{0.14}}{S_0^{0.8}}, \quad (b) \quad (6)$$

где $a = 0,00004$, $b = -0,044$, $c = 16,5$.

Переход к зависимости $T = f(n_x, S_0, P_0)$ возможен по формуле

$$T = t_m \cdot N = \frac{40 \cdot B_{\text{раб}} \cdot K \cdot i \cdot \delta_{\text{ах}}}{S_0 \cdot n_x \cdot \delta_x}, \quad (7)$$

где T — стойкость хона, мин;

t_m — машинное время обработки одной детали, мин;

N — количество обработанных деталей одним хоном, шт;

$B_{\text{раб}}$ — длина рабочего хода инструмента, мм;

K — число двойных ходов инструмента в цикле обработки;

i — передаточное отношение между хоном и деталью;

$\delta_{\text{ах}}$ — толщина алмазного слоя у нового инструмента, мкм.

После подстановки в (7) всех величин, определяемых параметрами зубчатых колес и инструмента, а также значение δ_x (b), получаем

$$T = \frac{C_t}{P_0^{0.14} \cdot n_x^{0.5} \cdot S_0^{0.2}}; \quad (8)$$

где $C_t = 2,7 \cdot 10^8$.

Теоретическое исследование по определению степени влияния меняющихся параметров обрабатываемых зубчатых колес на характер полученных зависимостей проведено с использованием основных положений теории зубчатого зацепления.

Физический процесс резания при зубохонинговании представляет собой царапание абразивными зернами инструмента поверхности детали, которое происходит за счет наличия скорости скольжения, возникающей при скрещивании под некоторым углом осей хона и обрабатываемого зубчатого колеса. Теоретически точечный контакт между поверхностью зубьев детали и инструмента в результате внедрения зерен абразива и контактных деформаций вырождается в контакт по некоторой площадке, что способствует вовлечению в процесс резания большого числа абразивных зерен. Принимая это во внимание, можно

с определенными допущениями аналитически вывести отражающую качественную сторону процесса зависимость для определения интенсивности съема припуска в некоторый момент времени. Для этого введено понятие теоретического съема - Q_t , определяемого длиной рисок (царапин) - ℓ_d , площадью контакта - F_k , глубиной внедрения зерен - t и измеряемого в условных единицах

$$Q_t = f(\ell_d, F_k, t). \quad (9)$$

Длина рисок и площадь контакта определяются по известным формулам теории зацепления (приведены в диссертации), в которые входят в качестве составляющих все геометрические параметры зубчатых колес. Поэтому, используя эти формулы и развернутую зависимость (9), можно проследить за воздействием этих параметров на съем. На рис.2 представлены графики отражающие влияния угла скрещивания и диаметров шестерен на величину теоретического съема, которые получены при анализе развернутой зависимости (9).

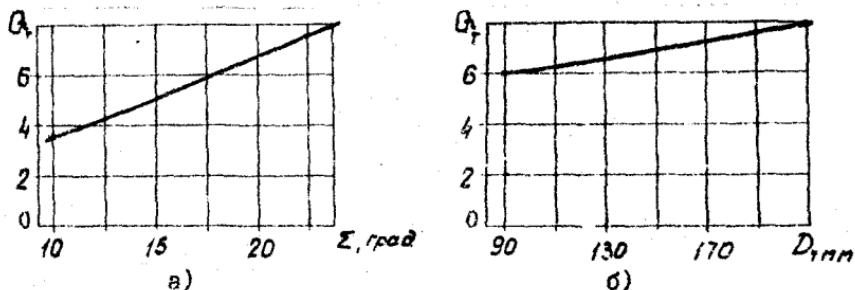


Рис.2. Влияние угла скрещивания (а) и диаметров обрабатываемых зубчатых колес (б) на величину теоретического съема

Установленные теоретические зависимости позволили расширить область применения полученных экспериментальных данных. То есть, если на основе экспериментальных результатов можно было рассчитать оптимальные режимы для исследованных зубчатых колес, то использование теоретических зависимостей позволило провести коррекцию этих режимов для зубчатых колес с произвольными характеристиками.

4. Оптимизация процесса зубошлифования

Важным моментом при оптимизации процессов обработки резанием является выбор критерия оптимальности, необоснованное назначение которого может привести к ошибочным выводам и рекомендациям.

В процессе определения оптимальных параметров режима зубохонингования за критерий оптимальности принята наименьшая технологическая себестоимость операции. Принятый критерий оптимальности представлен в виде функции от оптимизируемых параметров процесса зубохонингования (целевой функции)

$$C_o = \frac{2 B_{p,x} \cdot \delta \cdot i \cdot (a n_x^2 + B n_x + C)}{S_o^{0.24} \cdot n_x \cdot \rho_o^{0.9}} \left(A + \frac{4 \cdot \rho_o^{0.44} \cdot n_x^{1.5} \cdot S_o^{0.2}}{C_f} \right), \quad (10)$$

где

C_o - технологическая себестоимость, коп;

δ - снимаемый припуск с детали, мм;

A - технологическая стоимость одной станкоМинуты без учета затрат на инструмент, коп/мин;

i - стоимость эксплуатации инструмента, коп.

Неравенства и уравнения, характеризующие технологические ограничения процесса зубохонингования, и уравнение для оценки режимов резания (целевая функция) позволили сформировать оптимизационную систему процесса

$$n_x \cdot \rho_o \leq \frac{N_{ct} \cdot 2 \cdot 1000 \cdot 102}{\pi \cdot d_x};$$

$$n_x \geq n_{ct, min}; \quad n_x \leq n_{ct, max};$$

$$S_o \cdot n_x \geq S_{ct, min} \cdot i; \quad S_o \cdot n_x \leq S_{ct, max} \cdot i;$$

$$\rho_o \geq \frac{M_{t, ct, min}}{2x}; \quad \rho_o \leq \frac{M_{t, ct, max}}{2x};$$

$$\frac{\rho_o^{0.9}}{S_o^{0.24} \cdot (a n_x^2 + B n_x + C)} = \frac{\delta}{K}, \quad K = 1, 2, \dots, 5;$$

$$\left. \begin{aligned} f &= 2 \cdot B_{p,x} \cdot \delta \cdot i \cdot (a n_x^2 + B n_x + C) \cdot \left(A + \frac{4 \cdot \rho_o^{0.44} \cdot n_x^{1.5} \cdot S_o^{0.2}}{C_f} \right), \quad (12) \\ &S_o^{0.24} \cdot n_x \cdot \rho_o^{0.9} \end{aligned} \right\}$$

где

N_{ct} - мощность электродвигателя главного электропривода станка, квт;

i - коэффициент полезного действия;

d_x - делительный диаметр хона, мм;

M_t - тормозной момент, кгм;

$2x$ - радиус делительный обрабатываемого колеса.

Задача состояла в том, чтобы среди всех возможных неотрицательных решений n_x , ρ_o , S_o системы (II) найти такие их значения,

при которых функция (12) примет наименьшее значение. Для выбора рационального метода решения полученной оптимизационной системы проведен ее анализ.

Исследование целевой функции (12) в используемом в практике зубохонингования диапазоне значений режимов резания (Π_x, S_o, ρ_o) показало (рис.3), что она является овражной (овраг по S_o).

Установлено влияние на величину частных оптимальных значений Π_x остальных параметров режима (ρ_o, S_o).

Учитывая узкий диапазон этого изменения — $\Delta \Pi_x, \text{Optim} = 50$ об/мин, что гораздо меньше ступеней изменения чисел оборотов на зубохонинговых станках, предложено проведение коррекции и принятие в качестве оптимального значения Π_x, Optim ближайшую к множеству Π_x, Optim ступень чисел оборотов станка. Для наиболее распространенного при зубохонинговании станка мод. 5Б913 оптимальным значением окружной скорости является

$$\Pi_x, \text{Optim} = 500 \text{ об/мин.}$$

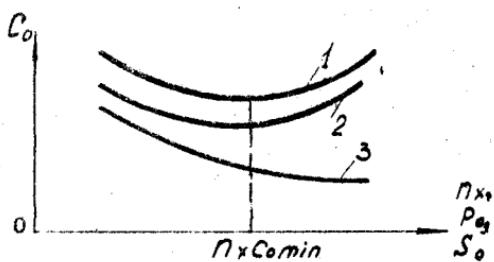


Рис.3. Изменение технологической себестоимости обработки в зависимости от окружной скорости (1), величины нагрузления (2), величины подачи (3)

Функция цели (12) в координатах $S_o - \rho_o - C_o$ (значение $\Pi_x = \Pi_x, \text{Optim}$) имеет вид, показанный на рис.4.

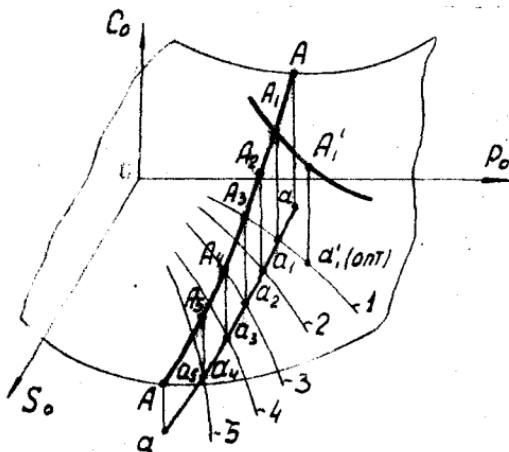


Рис.4. Функция цели

Минимум данной овражной функции находится на нижней границе оврага, которая определяется последним из технологических ограничений (II). Это ограничение (условие снятия припуска за целое число ходов инструмента) накладывает на параметры режима определенную взаимосвязь. Линии I,2...5 являются геометрическим местом точек, координаты которых удовлетворяют уравнению технологического ограничения при $\alpha_x = \alpha_{opt}$,

$\delta = \delta_{opt}$ и $K = 1,2 \dots 5$ двойных ходов. При этом, в силу овражности функции, оптимальными значениями режимов не являются координаты точек $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5$ (проекция дна оврага). Эти значения определяются на линиях I,2...5 (точка α'_{opt}), для чего необходимо решить совместно уравнения целевой функции и последнего технологического ограничения (II).

Результаты расчета по определению оптимальных режимов для зубчатых колес с параметрами: $m = 5 \text{ мм}$, $Z = 27$, $\beta = 50 \text{ мм}$,

$\beta = 19^{\circ}28'47''$ приведены в табл.2. Анализ влияния на себестоимость числа двойных ходов показал, что оптимальной для этих колес является обработка за два двойных хода инструмента.

Таблица 2
Оптимальное значение режимов

Параметры режима	Режимы при числе двойных ходов K				
	1	2	3	4	5
P_o , кгс	21,9	19,4	17,8	17	16,3
S_o , мм/об.дет.	0,148	0,33	0,503	0,676	0,87

Проведение коррекции рассчитанных оптимальных режимов для конкретных зубчатых колес, принимаемых за основу, при их назначении для других условий обработки, ориентируясь при этом на одинаковую интенсивность съема припуска, осуществлено при использовании зависимости (3).

Для этого введены поправочные коэффициенты K_d и K_s , которые определяются из соотношений:

$$K_d = \frac{K_d}{K_s^{0.76}}, \quad (13) \quad K_d = \frac{1}{K_s^{0.76}} \quad (14) \quad K_s = K_s \cdot K_s, \quad (15)$$

где K_d - коэффициенты, определяемые из зависимости (9) и показывающие во сколько раз съемку базовых шестерен больше (меньше) по отношению к рассматриваемым,

K_d - поправочный коэффициент на окружную скорость ходя,

K_s - поправочный коэффициент на подачу.

Использование коэффициента K_d для увеличения или уменьшения скорости резания (поддержания ее на оптимальном уровне), учитывая ступенчатость чисел оборотов стакна, рекомендуется при значительных отличиях в угле скрешивания при обработке базовых и рассматриваемых шестерен.

Например, при сработке зубчатого колеса с диаметром $d_a=125$ мм, углом зацепления $\alpha=20^\circ$ и при угле скрешивания $\Sigma=12^\circ30'$ подрезочные коэффициенты можно определить следующим образом. Согласно полной зависимости (9) $K_x=1,5$ и $K_d=1,05$. Учитывая, что $\Delta\Sigma=7^\circ$ (базовое $\Sigma=19^\circ28'47''$), принимаем $K_d=1,26$ (ближайшая ступень чисел оборотов станка 5В913 $n_x=630$ об/мин). Тогда из (13) $K_s=0,68$, из (14) $K_{s_d}=0,94$ и согласно (15) $K_s=0,68 \cdot 0,94 = 0,64$.

Значения оптимальных режимов резания для рассматриваемого колеса следующие: $n_x=630$ об/мин, $S_x=0,33 \cdot 0,64 = 0,21$ мм/об. дат., $P_x=19,4$ кгс. Или, пересчитывая значение величины подачи на оборот на минутную, а окружное усилие на тормозной момент, получим: $n_x=630$ об/мин, $S_x=250$ мм/мин, $M_t=1,1$ кгс·м.

Используя данную методику, определены режимы алмазного зубохонингования (окружная скорость хона - табл.3, минутная подача - табл.4, окружное нагружение - табл.5) для наиболее распространенных в практике типоразмеров шестерен.

Таблица 3

Рекомендуемая окружная скорость хона

Диаметр обрабатываемого колеса d_a , мм	Число оборотов зубчатого хона при угле скрешивания Σ			n_x (об/мин)
	до 15°	$15^\circ - 20^\circ$	св. 20°	
до 250	630	500	400	
св. 250	500	400	315	

Таблица 4

Рекомендуемая минутная подача

Угол скрешивания осей Σ	Продольная минутная подача S_x (мм/мин) при диаметре обрабатываемого колеса d_a , мм				
	до 100	100-150	150-200	200-250	св. 250
до 15°	330	250	190	160	120
$15-20^\circ$	350	280	220	180	130
св. 20°	360	300	240	200	140

Таблица 5

Рекомендуемое усилие нагружения

Угол зацепления	Тормозной момент обрабатываемого колеса		M_T (кгс·м) при диаметре		
	до 100	100-150	150-200	200-250	свыше 250
20°	0,7	1,1	1,5	2	2,25

5. Исследование эффективности алмазного зубохонингования закаленных зубчатых колес. Внедрение результатов исследования

Основные положения, касающиеся вопросов выбора характеристики инструмента и назначения оптимальных режимов зубохонингования, а также возможности повышения качества зубчатых колес, были проверены в производственных условиях путем внедрения полученных в результате исследований рекомендаций на ряде заводов.

Исследование эффективности алмазного зубохонингования проводилось при обработке закаленных зубчатых колес гидравлического насоса Г II-2 и раздаточной коробки автомобиля "Урал" во оптимальных режимах в производственных условиях Новоярского механического и Уральского автомобильного заводов. При этом определялись:

1. Величина снимаемого припуска.

2. Повышение точности изготовления зубчатых колес по комплексу основных показателей.

3. Снижение шероховатости рабочих поверхностей зубьев, возможность удаления забоин и заусенцев.

4. Степень снижения уровня шума.

Получены следующие результаты:

1. За период цикла обработки снимается припуск 0,015-0,02 мм на толщину зуба.

2. Снижение погрешностей изготовления закаленных зубчатых колес по различным показателям составляет от 6 до 23% (рис.5).

3. Снижение шероховатости рабочих поверхностей втульев зубчатых колес составляло I кл., забоины и заусенцы устранились.

4. Снижение уровня шума шестерен составляло - 2 дБ.

Кроме того, проведенные заводом с участием автора испытания зубчатых колес показали, что алмазное зубохонингование позволяет повысить их средневероятностную долговечность по контактной выносливости на 11%.

Сравнительная оценка эффективности применения разработанных режимов показала, что себестоимость обработки может быть снижена до 2-4 раз по сравнению с обработкой на неоптимальных режимах.

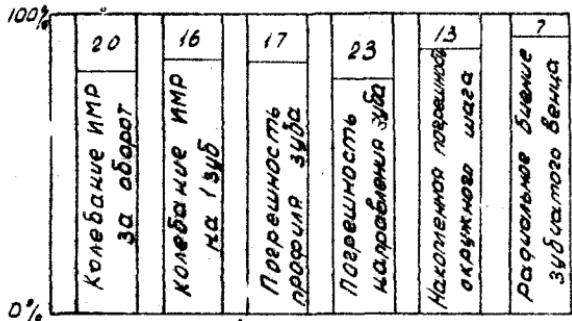


Рис.5. Снижение погрешностей изготовления закаленных зубчатых колес алмазным зубохонингованием

Проведенные исследования по алмазному зубохонингованию, а также обобщение большого материала по абразивному зубохонингованию позволили разработать рекомендации нормативного характера по наладке операций зубохонингования. Эти материалы включены отдельным разделом в третье издание справочника "Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках", изданного Центральным бюро нормативов по труду при НИИТруда в 1977г. и рекомендованного для применения во всех отраслях машиностроения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Многофакторность и достаточный уровень надежности процесса зубохонингования обусловили, что основным направлением его совершенствования на современном этапе является оптимизация.

2. Исследования, проведенные при формировании математической оптимизационной системы, позволили установить основные технологические ограничения, характеризующие процесс алмазного зубохонингования, а также показали, что характер влияния режимов резания на интенсивность съема металла и стойкость хонов при зубохонинговании качественно не зависит от геометрических параметров детали и инструмента.

3. Структура сформированной оптимизационной системы для выбранного критерия оптимальности, являющегося технологической себестоимостью, позволяет осуществить аналитическое решение полученной задачи нелинейного программирования.

4. Оптимизация режимов является эффективным направлением совершенствования алмазного зубохонингования. Производственные испытания процесса на оптимальных режимах показали, что:

а) алмазным зубохонингованием возможно комплексное повышение на 6-23% точности зубчатого венца закаленных шестерен по основным показателям ГОСТа 1643-72, снижение на I-2 кл. шероховатости рабочих поверхностей зубьев;

б) алмазное зубохонингование позволяет снизить уровень шума зубчатых колес на 2 дБ, повысить их средневероятностную долговечность по контактной выносливости на II%;

в) себестоимость обработки может быть снижена до 2-4 раз по сравнению с обработкой на неоптимальных режимах.

5. На основе теоретического и экспериментального исследования разработаны рекомендации по выбору режимов и наладке операций зубохонингования, которые прошли апробацию на заводах и включены отдельным разделом в "Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования на шлифовальных и доводочных станках".

6. Процесс алмазного зубохонингования внедрен на Нововятском механическом заводе с экономическим эффектом 51,7 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Алмазное зубохонингование закаленных шестерен.-"Автомобильная промышленность", 1976, №9. (В соавторстве с Жугиным Н.Г. и Буториным Г.И.).

2. Влияние технологических параметров алмазного зубохонингования на качество шестерен.-В сб."Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". №178, ЧИИ, Челябинск, 1976. (В соавторстве с Буториным Г.И.).

3. Опыт алмазного зубохонингования крупномодульных закаленных шестерен.-В сб."Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". №178, ЧИИ, Челябинск, 1976. (В соавторстве с Буториным Г.И. и Жугиным Н.Г.).

4. Вопросы оптимизации процесса зубохонингования.-В сб."Повышение качества и технологии изготовления редукторов общего назначения". Киев, 1977.

5. Оптимизация процесса алмазного зубохонингования.-В сб. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве". Киев, 1977.