

5.02.08

41

Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

Белькорецкий Наум Львович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ  
КОЛЕС С НАКАТЫВАНИЕМ ЗУБЬЕВ

05.02.08 - "Технология машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1982

11111

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

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
МАТВЕЕВ В.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
ПОНОМАРЕВ В.П.,

кандидат технических наук, доцент  
МИКОВ Ю.Г.

Ведущее предприятие - производственное объединение  
"АвтоЗИЛ".

Защита состоится 26 мая 1982 года, в 14 ч на заседании специализированного совета К.053.13.01 по технологии машиностроения Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1982 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

профессор  В.М. МЕНЬШАКОВ

Актуальность проблемы. Одним из главных направлений повышения эффективности общественного производства является снижение металлоемкости и трудоемкости продукции машиностроения. Типовые технологические процессы обработки резанием массовых деталей машин - крупномодульных зубчатых колёс имеют низкий коэффициент использования металла, 0,5 - 0,55 и высокую трудоемкость. Прогрессивный технологический процесс изготовления зубчатых колёс горячим накатыванием обеспечивает: сокращение расхода металла на 20%; повышение прочности и долговечности колёс, уменьшение затрат времени на зубообработку в 5-7 раз и на инструмент в два раза.

Низкая кинематическая точность накатанных зубчатых колёс и трудность построения комплексного технологического процесса их обработки приводят к значительному (2-2,5%) количеству деталей с неисправимыми дефектами после операции чистовой зубообработки. Это сдерживает широкое внедрение прогрессивного технологического процесса зубонакатывания.

Цель работы. Исследовать комплексный технологический процесс изготовления крупномодульных зубчатых колёс горячим накатыванием. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать способы повышения кинематической точности накатанных колёс и уменьшения погрешности их базирования при механической обработке с целью сокращения брака по следам предыдущей обработки на операции чистового зубофрезерования. Расширить внедрение прогрессивного процесса зубообработки на базе выполненных исследований.

Общая годика исследований. Математическое описание зависимостей: кинематической точности накатанных зубчатых колёс от радиального биения заготовки и погрешности центрирования колёс в трёхкулачковом патроне от угла расположения плавающих роликов основывалось на использовании основных положений теории зубчатого зацепления, гармонического анализа и математической статистики. Экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях.

### Научная новизна работы

1. На основе анализа процесса накатывания зубчатых колёс двумя инструментами, предложена теоретическая зависимость колебания длины общей нормали колеса от радиального биения заготовки. Аналитическое исследование зависимости позволило дать рекомендации по выбору номенклатуры зубчатых колёс для горячего накатывания.
2. Раскрыта взаимосвязь кинематической точности накатанных зубчатых колёс с биением заготовки, закручиванием звеньев кинематических цепей накатного стана под нагрузкой и точностью и шероховатостью рабочих поверхностей инструментов.
3. Анализ центрирования накатанных зубчатых колёс на операции растачивания базового отверстия позволил обосновать необходимость базирования их по эвольвентным поверхностям зубьев. На основе гармонического анализа "базовых контуров" накатанных колёс предложена теоретическая зависимость погрешности их центрирования в трехкулачковых, шестироликовых патронах с плавающих роликами, от угла расположения роликов каждого кулачка. На основе полученной зависимости даны рекомендации по проектированию патронов для обработки накатанных зубчатых колёс.

### Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Проведен анализ влияния технологических факторов на кинематическую точность накатанных зубчатых колёс, что позволило определить основные направления повышения точности зубонакатывания.
2. Предложен способ накатывания с обтачиванием заготовок на стане, позволяющий уменьшить кинематическую погрешность накатанного колеса на 28-30% благодаря уменьшению радиального биения заготовки.
3. Предложен способ зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей инструмента и заготовки на определенной стадии процесса, позволяющий повысить кинематическую точность накатанного зубчатого колеса на 22-25% за счет уменьшения рассогласования угловых скоростей звеньев стана.
4. Предложен способ изготовления инструментов-зубонакатников обеспечивающий повышение кинематической точности накатанных

зубчатых колёс на 18-20% и уменьшение мощности накатывания.

5. Предложена конструкция патрона с самоустанавливающимися роликами для центрирования накатанных зубчатых колёс на операции растачивания отверстия, в результате чего радиальное биение колёс уменьшено в 1,9 раза.

На Челябинском тракторном заводе внедрены инструменты-зубонакатники измененной конструкции. На Челябинском заводе тракторных агрегатов внедрены патроны для центрирования накатанных зубчатых колёс с самоустанавливающимися роликами. В производственном объединении ЧТЗ расширено внедрение прогрессивной технологии горячего зубонакатывания крупномодульных колёс, что позволило получить годовой экономический эффект более 100 тыс. рублей и сократить количество дефектных деталей до 0,5 - 1,2%.

- Способ зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей принят Всесоюзным научно-исследовательским институтом металлургического машиностроения для проектирования нового поколения зубонакатных станков.

Апробация работы. Основные материалы диссертации были доложены:

1. На научно-технических конференциях ЧПИ, Челябинск 1977, 1978 г.г.
2. На заседании совета центральной лаборатории резания металлов ПО "ЧТЗ им.В.И.Ленина".
3. На объединенном заседании кафедр "Технология машиностроения", "Станки и инструмент", "Автоматизация механосборочного производства", "Технология металлов" ЧПИ, Челябинск, 1982 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ и получено 3 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертация состоит из введения и шести глав, включает 17 таблиц, 63 рисунка, список литературы из 70 наименований и приложения. Объем работы 178 страниц машинописного текста.

В первой главе рассматривается состояние вопроса изготовления зубчатых колёс горячим накатыванием. Большинство известных исследований посвящено процессу собственно горячего зубонакатывания. А.Д.Кузьмин, М.В.Васильчиков, В.Ф.Муконин, И.М.Капитонов, Л.В.Жириков исследовали технологические режимы и усилия

горячего зубонакатывания, точность накатанных зубчатых колёс и припуски для чистовой зубообработки. А.М.Брон и Э.В.Куш исследовали инструменты-зубонакатники и предложили способы корректировки профилей зубьев инструментов. Барбарич М.В. выявил значительные рассогласования углов поворота шпинделей заготовки и инструмента при горячем зубонакатывании, что приводит к закручиванию цепей привода шпинделей. Сумин А.И. предложил способ зубонакатывания с дополнительным гладким роликом и широкозахватный фиксатор для базирования накатанных колёс на операции чистового зубофрезерования. В.П.Пономарев исследовал погрешности базирования по отклонениям формы зубчатого венца и предложил устройство центрирующее зубчатое колесо по всем впадинам. Анализ действующего технологического процесса показывает, что базирование заготовки на зубонакатном стане по черным поверхностям приводит к значительному радиальному биению, которое остается высоким и после обкатывания-калибрования, достигая величины 2,2 мм. Составляющие кинематической погрешности накатанных зубчатых колёс имеют средние значения: колебание длины общей нормали 0,8 мм; некруглость зубчатого венца, проявляющаяся в колебании размера по роликам 0,42 мм. Способ базирования накатанных колёс по поверхностям впадин зубьев на операции растачивания отверстия приводит к смещению его оси относительно зубчатого венца до 0,3 мм. В результате чего на операции чистового зубофрезерования часть деталей имеет неисправимые дефекты из-за недостаточности припуска на рабочей поверхности зубьев. Сокращение числа дефектных деталей путем увеличения припуска увеличивает расход металла и существенно понизит долговечность инструментов, вследствие уменьшения толщины их зубьев. На основании изложенного для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ влияния технологических факторов на точность накатанных в горячем состоянии зубчатых колёс и определить основные направления повышения их кинематической точности;
2. Определить теоретическую зависимость кинематической погрешности накатанного зубчатого колеса от радиального биения заготовки и дать рекомендации по выбору номенклатуры зубчатых колёс для накатывания;
3. Разработать способы зубонакатывания с обтачиванием нагретых заготовок на стане для уменьшения их радиального биения;

мия и исследовать экспериментально кинематическую точность колёс накатанных этими способами;

4. Разработать способ зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей инструмента и заготовки для уменьшения рассогласования углов их поворота под нагрузкой и исследовать экспериментально кинематическую точность накатанных этим способом колёс;
5. Исследовать зависимость кинематической точности накатанных зубчатых колёс от точности и шероховатости рабочих профилей зубьев инструментов-накатников;
6. Определить теоретическую зависимость смещения оси базового отверстия накатанного зубчатого колеса от способа центрирования на операции растачивания и предложить на этой основе способ центрирования, обеспечивающий минимальное смещение;

Во второй главе рассматривается влияние технологических факторов на кинематическую точность накатанных зубчатых колёс. Источниками кинематических погрешностей при накатывании зубчатых колёс, так же как и при других способах зубообработки являются геометрические и кинематические погрешности оборудования, геометрические погрешности заготовки и ошибки её базирования, погрешности инструмента и т.п. Вместе с тем при горячем накатывании действуют ряд факторов свойственных только этому способу. К ним относятся: большие усилия формирования зубьев, достигающие 15-25 тонн; недостаточная крутильная и поперечная жесткость зубонакатных станков под нагрузкой; температурные деформации заготовки и инструмента и т.д.

Для определения доминирующих технологических факторов, определяющих кинематическую точность накатанного колеса, на основе накопленного опыта горячего зубонакатывания и анализа материалов известных исследований разработана логическая схема влияния технологических факторов. Многочисленные источники кинематической погрешности накатанных колёс сгруппированы в четыре основных фактора: погрешности заготовки; погрешности закона движения производящих инструментов и заготовки; погрешности зубонакатного инструмента; температурные деформации. Поскольку температурные деформации достаточно описаны в литературе в настоящей работе исследуются только три обобщенных фактора.

Теоретическая зависимость колебания длины общей нормали накатанного зубчатого колеса от радиального биения исходной заго-

товки предложена на основе анализа процесса накатывания и экспериментальных данных о совпадении величины радиального биения заготовки с колебанием рамки центрального шпинделя. В этом случае можно представить, что накатывание зубьев происходит как-бы при различных межосевых расстояниях  $a_{\omega}$  и  $a_{\omega} + E$ , в результате чего зубья инструментов формируют на противоположных участках колеса разнотолщинные зубья. Где  $E$  радиальное биение заготовки. Максимальная и минимальная длины общей нормали в пределах колеса определяются из выражений:

$$W_{\max} = (Zn - 1) P\beta + S_{\beta 2}^k; \quad W_{\min} = (Zn - 1) P\beta + S_{\beta 1}^k,$$

где  $S_{\beta 2}^k$  и  $S_{\beta 1}^k$  толщины зубьев колеса по дуге основной окружности, сформированные при различных межосевых расстояниях. Колебание длины общей нормали при постоянных для данного колеса  $Zn$  и  $P\beta$

$$V_{wz} = W_{\max} - W_{\min} = S_{\beta 2}^k - S_{\beta 1}^k.$$

Используя формулы теории зубчатого зацепления, делая соответствующие преобразования и введя условное обозначение

$$C = \frac{(d_{\beta}^k + d_{\beta}^k)^2}{4}$$

получим выражение

$$V_{wz} = 2 \left[ \sqrt{(a_{\omega} + E)^2 - C} - \sqrt{a_{\omega}^2 - C} \right] \left[ 1 - \frac{C}{a_{\omega}(a_{\omega} + E)} \right].$$

Анализ полученного выражения показывает, что колебание длины общей нормали накатанного зубчатого колеса является степенной функцией геометрических размеров передачи инструмент-зубчатое колесо и радиального биения заготовки. График (рис.1) построенный по теоретической зависимости указывает на рост колебания длины общей нормали накатанных колёс при уменьшении числа их зубьев и неизменном биении заготовки.

Для повышения кинематической точности зубонакатывания предложены новые способы с обтачиванием нагретых заготовок на стане по приведенной схеме (рис.2). Экспериментальное исследование зубонакатывания с обтачиванием заготовок радиальным врезанием до и после обкатывания а также продольным точением до обкатывания показывает, что наилучшие результаты - уменьшение средней величины радиального биения заготовок в 2,5 раза обеспечивает последний способ обтачивания.



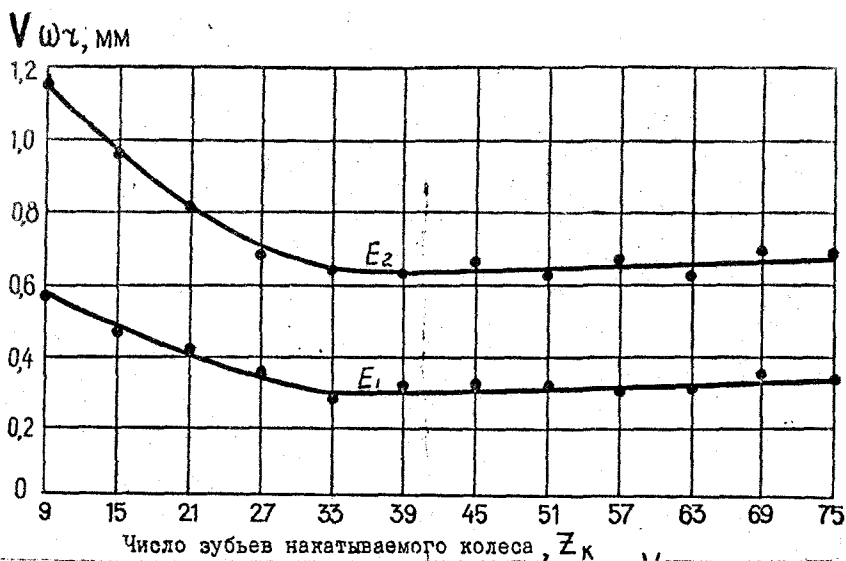


Рис. 1. Зависимость колебания длины общей нормали  $V_{\omega r}$  накатанного колеса  $m = 7$  мм от числа зубьев  $Z_k$  при радиальном биении исходной заготовки  $E_1 = 0,5$  мм и  $E_2 = 1,0$  мм. Число зубьев инструмента  $Z_u = 45$

Соответственно при накатывании зубьев на заготовках обточенных продольной подачей резца до обкатывания получены лучшие результаты по кинематической точности накатанных колёс. Средние значения колебания длины общей нормали уменьшены на 31%, колебания размера по ролику на 28% по сравнению с действующим технологическим процессом.

В третьей главе приведены данные экспериментального исследования усилий резания при обтачивании нагретой заготовки радиальной подачей с помощью динамометрического суппорта.

Для вычисления составляющих усилия резания  $P_z$  и  $P_y$ , а также реакций опоры резцедержателя  $R_1$  и  $R_2$  по измеренному в эксперименте усилию  $R_u$  использованы выражения:

$$P_z = R_u \frac{e_u}{l_z + k l_y} = 0,585 R_u; \quad P_y = R_u \frac{k e_u}{l_z + k l_y} = 0,789 R_u;$$

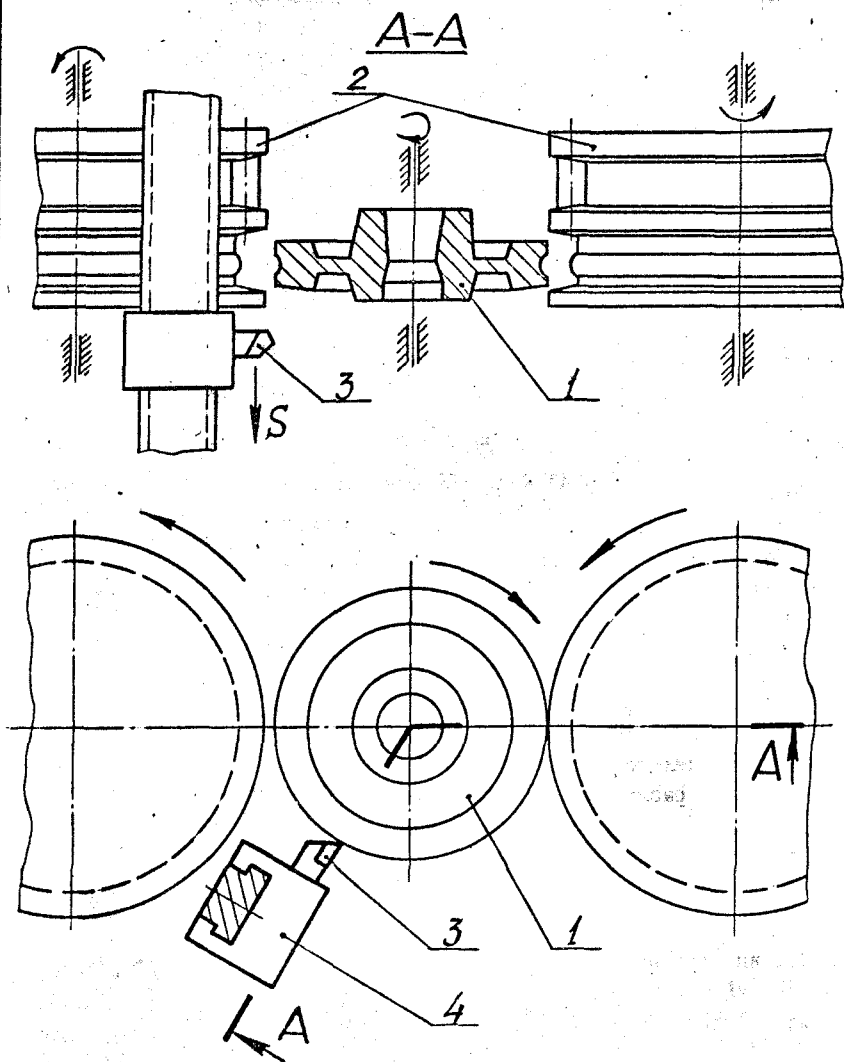


Рис.2. Схема осуществления процесса зубонакатывания с обтачиванием заготовки:

1 - заготовка, 2 - накатники, 3 - резец, 4 - суппорт

$$P_1 = R_u \left[ \frac{l_u}{l_z + K l_y} (K \cos d_1 - \sin d_1) - 1 \right] = 0,29 R_u;$$

$$P_2 = R_u \frac{l_u}{l_z + K l_y} (K \sin d_1 + \cos d_1) = 0,68 R_u,$$

где  $l_u, l_z, l_y$  и  $d_1$  плечи действия сил и угол резания, определяемые из геометрических размеров резцового суппорта. Коэффициент соотношения сил резания  $K = \frac{P_y}{P_z}$ , принят равным 1,35. Суммарное усилие резания  $P_c$  определяется как векторная сумма составляющих усилий резания  $P_z$  и  $P_y$ :

$$P_c = \sqrt{P_z^2 + P_y^2} = 0,98 R_u.$$

Практическое равенство суммарного усилия резания и измеренного усилия обеспечивается конструкцией резцового суппорта и режущего инструмента.

Анализ экспериментальных данных показывает, что тангенциальная составляющая силы резания при обтачивании радиальной подачей нагретых до температуры 900-1000 градусов заготовок в 2-3 раза ниже чем при аналогичной обработке при нормальной температуре. Суммарные силы резания при обтачивании до обкатывания на 20% выше чем после обкатывания и достигают значений 750-790 кгс.

В четвертой главе приводится кинематический анализ зубонакатывания, который указывает на то, что лишь в момент первоначального касания инструмента и заготовки их окружные скорости в точке контакта равны между собой. Это достигается коррекцией зубьев инструмента, в результате которой обеспечивается соотношение правильного деления:

$$\frac{z_{au}}{z_3} = \frac{z_u}{z_k},$$

$z_{au}, z_3$  - радиусы окружностей вершин зубьев инструмента и заготовки для зубонакатывания;

$z_u, z_k$  - числа зубьев инструмента и накатываемого колеса.

Согласно отношению  $\frac{z_u}{z_k}$  настраиваются кинематические цепи зубонакатного станка. По мере внедрения инструмента в заготовку возникает разность окружных скоростей вершин зубьев инструмента  $V_1$  и впадин зубьев колеса  $V_k$ , т.к. инструмент, имеющий постоянный радиус окружности вершин зубьев  $-z_{au}$  контактирует с

переменным радиусом впадин зубьев накатываемого колеса  $Z_x$ , который непрерывно уменьшается на величину радиальной подачи, в результате чего  $\Delta V = V_1 - V_x$  растет. Наличие разности окружных скоростей инструмента и детали в точке контакта вызывает их относительное скольжение. Большие усилия радиальной подачи инструмента и повышенный коэффициент трения нагретого металла препятствуют этому скольжению, в результате чего зуб инструмента, как бы "обгоняет" колесо, что проявляется в тангенциальном сдвиге металла во впадине колеса и закручивании звеньев стана, которое формирует кинематическую погрешность колеса.

Погрешность угла поворота колеса  $\Delta \varphi$  на длине дуги, равной приближенно одному угловому шагу может быть представлена в виде выражения

$$\Delta \varphi = \varphi_x - \varphi_2 + \Delta \varphi_1 \text{ и } \varphi.$$

$\varphi_x$  - фактический угол поворота накатываемого колеса;

$\varphi_2$  - теоретический угол поворота накатываемого колеса;

$u_{\varphi}$  - фактическое передаточное отношение.  
Подставляя в выражение  $\Delta \varphi$  значение углов и делая допущение, что межосевое расстояние в передаче инструмент-колесо на дуге зацепления одного зуба не меняется, после преобразования получим

$$\Delta \varphi = \frac{Z_u \alpha}{Z_x} \left( \frac{2\pi}{Z_u} + \Delta \varphi_1 \right) - \frac{2\pi}{Z_k},$$

где  $\Delta \varphi_1$  - погрешность угловой настройки инструментов между собой.

На диаметре делительной окружности колеса  $Z = 27, m = 7$  мм такая угловая погрешность вызовет отклонение шага на  $0,121$  мм (без учета погрешности настройки инструментов) за один оборот. На стадии зубонакатывания, когда коэффициент перекрытия в передаче инструмент-колесо  $\{ \gg 1$  угловые погрешности накапливаются и закручивание возрастает, достигая по данным экспериментальных исследований 57-65 минут в конце процесса накатывания.

Высказана гипотеза об уменьшении закручивания звеньев стана и соответственно уменьшении кинематической погрешности накатанного колеса при разрыве кинематических цепей инструмента и заготовки, когда коэффициент перекрытия становится равным еди-

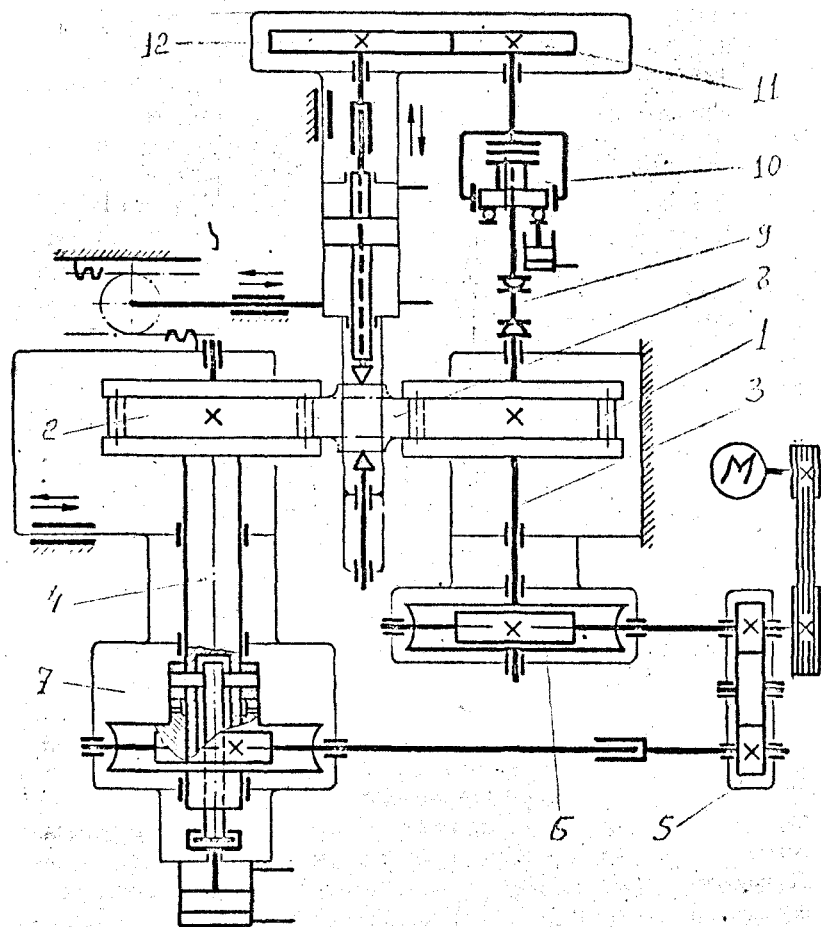


Рис.3. Стан для зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей: 7 и 10-муфты отключения вращения

нице, поскольку к этому моменту деление заготовки на заданное число зубьев уже заканчивается, что обеспечивает плавное, беззазорное зацепление инструмента и заготовки. Для апробации указанного положения предложен способ зубонакатывания с отключением принудительного вращения инструмента и заготовки и стан

для его осуществления (рис.3).

Экспериментальное исследование зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей показывает, что предложенный способ позволяет повысить кинематическую точность накатанного зубчатого колеса благодаря уменьшению рассогласования угловых скоростей звеньев стана. При этом также снижается на 20% относительная мощность зубонакатывания при полном врезании инструмента в заготовку. Наилучшие результаты обеспечивает отключение принудительного вращения инструментального шпинделя, когда коэффициент перекрытия в паре инструмент-колесо достигает единицы. Средние колебания уменьшаются: для длины общей нормали на 22% и для размера по ролику на 25%. Дополнительное отключение принудительного вращения шпинделя заготовки не вносит существенных изменений в величину кинематической погрешности накатанного колеса.

В пятой главе рассматривается зависимость кинематической точности накатанного зубчатого колеса от точности и шероховатости рабочих поверхностей зубьев инструмента.

Инструменты-зубонакатники по действующему технологическому процессу изготавливаются зубофрезерованием с последующей закалкой и отпуском. После термической обработки рабочие поверхности зубьев не обрабатываются. Фактическая точность зубчатого венца соответствует IО-II степеням точности по ГОСТу I643-72. Шероховатость рабочих поверхностей зубьев велика  $R_z = 20$  мкм, а направление следов обработки этих поверхностей не совпадает с направлением течения металла от ножки к головке зуба в процессе зубонакатывания. Шероховатость рабочих поверхностей инструмента, как известно, является основным фактором, определяющим величину контактного трения и существенно влияющим на деформирующее усилие и работу деформации. При этом величина коэффициента контактного трения различна в зависимости от направления скольжения металла по отношению следов обработки рабочей поверхности инструмента. Здесь имеет место "анизотропия трения". Для исследования взаимосвязи погрешностей накатанного зубчатого колеса и мощности зубонакатывания с погрешностями формообразующего инструмента была изготовлена партия зубонакатников с дополнительным шевингованием зубьев. В результате шевингования (после термической обработки) точность параметров зубчатого венца накатников повысилась в 2-4 раза и соответствует 7-8 степе-

пени ГОСТ 1643-72.

Шероховатость улучшилась существенно ( $R_a = 4,3$  мкм), а направление следов обработки рабочих поверхностей зубьев инструмента значительно приближено к направлению течения металла при зубонакатывании. Немаловажное значение для повышения точности зубонакатывания приобретает то, что отклонения эвольвентных профилей шевингованных зубьев инструмента не только уменьшаются по абсолютной величине, но и меняют направление по сравнению с фрезерованными зубьями. Применяя специальные методы профилирования шевра можно обеспечить коррекцию зубьев накатников в необходимых размерах и направлениях.

Анализ экспериментальных данных показывает, что кинематическая точность группы деталей, накатанных шевингованным инструментом существенно повысилась по сравнению с деталями, накатанными фрезерованным инструментом. Средние значения колебаний длины общей нормали уменьшились на 23% и размера по ролику на 20%. Мощность зубонакатывания шевингованным инструментом понижается на 10-12%, что является результатом уменьшения коэффициента контактного трения.

В шестой главе рассматривается базирование накатанного зубчатого колеса на операции растачивания отверстия. С появлением заготовки с накатанными зубьями уже на первой операции механической обработки возникает необходимость обеспечить точность взаимного расположения накатанного зубчатого венца и отверстия, которое в дальнейшем явится базой на чистовой операции зубообработки. При базировании по поверхностям впадин накатанных зубьев, согласно действующему технологическому процессу возникают значительные погрешности взаимного расположения зубчатого венца и отверстия, которые приводят к радиальному биению зубьев до 1,3 мм. Использование в качестве базы поверхности выступов зубьев не меняет радиального биения. Экспериментальное исследование величины и последовательности изменения биения поверхностей зубчатых колёс на различных операциях механической обработки показывает, что радиальное биение зубьев после операции растачивания сохраняется почти без изменения на всех последующих операциях. Для правильного построения комплексного технологического процесса изготовления зубчатых колёс с накатанными зубьями необходимо обеспечить минимальное радиальное биение зубьев, начиная с первой операции растачивания отверстия. При этом базирование должно

осуществляться по эвольвентным поверхностям накатанных зубьев. Наименьшая погрешность центрирования цилиндрического зубчатого колеса по эвольвентным профилям зубьев достигается, когда количество самоустанавливающихся роликов равно числу зубьев. Известные конструкции патронов такого типа, с перемещением роликов от мембраны, резинового кольца и т.п. неработоспособны на операциях с большими усилиями резания, к которым относится растачивание черного отверстия у заготовки с накатанными зубьями.

В целях исследования возможности центрирования накатанных зубчатых колёс на операции растачивания отверстия в трехкулачковом патроне с рычажным приводом выполнено теоретическое исследование зависимости погрешности центрирования от угла расположения двух базовых роликов каждого кулачка. Результаты замеров по роликам накатанных зубчатых колёс показывают, что кривые, охватывающие ролики - "базовые контуры" имеют форму овала. Гармонический анализ "базовых контуров" позволил сделать вывод о том, что амплитуда второй гармоники  $C_2$ , связанная с величиной овальности значительно превышает амплитуду первой гармоники  $C_1$ , связанную с эксцентриситетом центра средней окружности "базовых контуров" относительно центра измерения базовых радиусов:

$$\frac{C_2}{C_1} = 4,35 \dots 19,97.$$

Исходя из этого, можно принять что центр "базового контура" и центр его средней окружности совпадают.

Погрешность центрирования колеса, имеющего овальный "базовый контур" в трехкулачковом, шестироликовом патроне с самоустанавливающимися роликами равна эксцентриситету  $\mathcal{E}_1$  центра средней окружности "базового контура" детали относительно центра вращения патрона (рис.4). Представляя базовый контур в виде непрерывной периодической функции  $\mathcal{Z} = f(\varphi)$ , где  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , воспользуемся разложением её в тригонометрический ряд Фурье:

$$f(\varphi) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^{i=k} (\alpha_k \cos k\varphi + \beta_k \sin k\varphi),$$

где постоянный член ряда  $\alpha_0$  равен диаметру средней окружности "базового контура". Коэффициенты ряда определяются по формулам:

$$\alpha_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \cos k\varphi d\varphi;$$



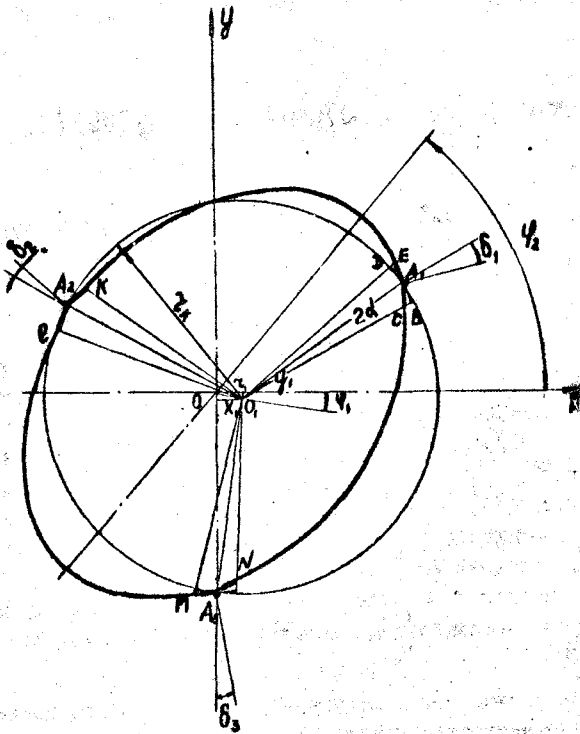


Рис. 4 Расчетная схема

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin k\varphi d\varphi.$$

Ограничивая разложение в ряд Фурье на составляющие первого и второго порядков и учитывая что  $z_1 = c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ , можно написать систему уравнений положения каждой базовой точки:

$$z(\alpha) = z_0 + x_1 \cos \alpha + y_1 \sin \alpha + c_2 \cos 2(\alpha - \varphi_2);$$

$$z(-\alpha) = z_0 + x_1 \cos \alpha - y_1 \sin \alpha + c_2 \cos 2(\alpha + \varphi_2);$$

$$z(120^\circ + \alpha) = z_0 + x_1 \cos(120^\circ + \alpha) + y_1 \sin(120^\circ + \alpha) + c_2 \cos 2(120^\circ + \alpha - \varphi_2);$$

$$z(120^\circ - \alpha) = z_0 + x_1 \cos(120^\circ - \alpha) + y_1 \sin(120^\circ - \alpha) + C_2 \cos 2(120^\circ - \alpha - \varphi_2);$$

$$z(-120^\circ + \alpha) = z_0 + x_1 \cos(-120^\circ + \alpha) + y_1 \sin(-120^\circ + \alpha) + C_2 \cos 2(-120^\circ + \alpha - \varphi_2);$$

$$z(-120^\circ - \alpha) = z_0 + x_1 \cos(-120^\circ - \alpha) + y_1 \sin(-120^\circ - \alpha) + C_2 \cos 2(-120^\circ - \alpha - \varphi_2).$$

Решая систему уравнений, получим выражение  $z_1 = C_2 \frac{\cos 2\alpha}{\cos \alpha}$ .

Из анализа полученного выражения видно, что эксцентриситет  $z_1$  принимает минимальное значение при  $\alpha = 45^\circ$  градусов, в этом случае  $z_1 = 0$  и максимальное значение при  $\alpha = 0$  градусов, при этом  $z_1 = C_2$ . В последнем случае получаем базирование по трем роликам, т.е. худший вариант центрирования зубчатого колеса. Из полученных данных можно сделать вывод, что при проектировании специальных трехкулачковых патронов для базирования зубчатых колёс по роликам необходимо располагать ролики одного кулачка под максимальным, конструктивно возможным углом в пределах  $\frac{\pi}{4}$ .

На основе полученных в результате теоретического исследования данных спроектирован и внедрен трехкулачковый шестироликовый патрон для центрирования зубчатых колёс с модулем 7 мм и числом зубьев 27. Для этого колеса угол между базовыми роликами должен быть кратным угловому шагу зубьев  $\mathcal{T} = 13^\circ 20'$ . Для размещения роликов под углом  $2\alpha = 90^\circ$  необходимо расположить их через шесть зубьев, т.к.

$$\frac{2\alpha}{\mathcal{T}} = \frac{90}{13^\circ 20'} = 6,75.$$

Конструктивно обеспечить такой большой угол между роликами не представилось возможным. Анализ экспериментальных данных обработки зубчатых колёс показывает что базирование в патроне (с углом между роликами  $26^\circ 40'$ ) уменьшило погрешность взаимного расположения осей накатанного зубчатого венца и расточенного отверстия почти в два раза по средним значениям. Среднее квадратическое значение этой погрешности также уменьшилось в 2 раза, что подтверждает стабильность базирования в новом патроне.

В случае применения шестироликового, трехкулачкового патрона для центрирования зубчатых колёс с  $\frac{z}{2} = 3n \pm 1$ , где  $n$  любое число, оси симметрии роликов двух кулачков оказываются смещёнными относительно осей самих кулачков в результате чего один ролик каждого из этих кулачков будет иметь зазор  $\Delta$  с контактной поверхностью кулачка. Из выполненного расчета следует, что при числе зубьев колеса 26 и 28, модуле 7 мм и диаметре базового ролика 13 мм, фактический зазор будет равным 0,02 мм. Такой зазор выбирается за счет упругих деформаций деталей патрона и поверхности зубьев колеса.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований сделаны выводы и предложены следующие рекомендации по усовершенствованию технологического процесса изготовления зубчатых колёс с применением горячего накатывания зубьев:

- Расширение внедрения высокопроизводительного и экономичного технологического процесса изготовления крупномодульных зубчатых колёс с горячим накатыванием зубьев сдерживается из-за низкой кинематической точности накатанных колёс и большой погрешности их центрирования на операции обработки базового отверстия, в результате чего выявляется недостаточность припуска по боковым поверхностям зубьев на операции чистового зубофрезерования.

- Источниками кинематических погрешностей технологического характера при горячем зубонакатывании являются многочисленные факторы, как свойственные другим видам зубообработки, так и специфические, связанные с нагревом, большими усилиями зубообразования и конструктивными особенностями оборудования. Предложено группировать двадцать четыре известных, взаимосвязанных факторов в четыре основных, обобщенных фактора:

- погрешность заготовки;
  - погрешность закона движения производящего инструмента и заготовки;
  - погрешность зубонакатного инструмента;
  - температурные деформации.
- Предложены и обоснованы критерии кинематической точности

накатанного зубчатого колеса: колебание длины общей нормали  $V_{Wz}$  и погрешность размера по роликам  $M_{Bz}$ .

- Предложена теоретическая зависимость колебания длины общей нормали накатанного зубчатого колеса, выражающаяся степенной функцией геометрических размеров передачи инструмент - колесо и радиального биения заготовки. Исследование теоретической зависимости показало, что колебание длины общей нормали накатанного колеса возрастает при уменьшении числа его зубьев и неизменном числе зубьев инструмента. При накатывании инструментом с числом зубьев 45 наименьшую кинематическую погрешность будут иметь зубчатые колёса с числом зубьев от 30 до 50.

Теоретическая зависимость колебания длины общей нормали от радиального биения заготовки хорошо согласуется с экспериментальными данными.

- Предложен новый способ зубонакатывания с обтачиванием нагретых заготовок резцом на стане, позволяющий уменьшить кинематическую погрешность накатанных зубчатых колёс благодаря уменьшению радиального биения заготовки. На основании проведенных исследований установлено, что наилучшие результаты обеспечивает обтачивание заготовок на стане продольной подачей резца до обкатывания. При этом колебание длины общей нормали уменьшилось на 31%, а погрешность размера по роликам на 28%. Средние квадратические отклонения этих величин уменьшились в два раза, что указывает на повышение стабильности способа зубонакатывания с обтачиванием заготовок.

- В результате экспериментальных исследований определены величины сил резания при обтачивании нагретых заготовок на стане. Установлено, что при обтачивании после обкатывания суммарная сила резания уменьшается в среднем на 20%.

- Предложен новый способ зубонакатывания с отключением принудительного вращения шпинделей инструмента и заготовки на определенной стадии процесса. Способ позволяет повысить кинематическую точность накатываемого колеса за счет уменьшения рассогласования угловых скоростей звеньев стана.

- На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что наилучшие результаты обеспечивает отключение принудительного вращения левого инструментального шпин-

деля, когда коэффициент перекрытия передачи инструмент-колесо достигнет единицы. Среднее колебание длины общей нормали накатанных этим способом колёс уменьшается на 22%, среднее колебание размера по роликам также уменьшается на 25%. Дополнительное отключение принудительного вращения шпинделя заготовки не вносит существенных изменений в величину кинематической погрешности накатываемого колеса.

- При отключении принудительного вращения инструментального шпинделя, когда коэффициент перекрытия близок к единице, наблюдается уменьшение относительной мощности зубонакатывания в среднем на 20% и калибровки на 50%, что свидетельствует о снижении усилий накатывания благодаря уменьшению рассогласования угловых скоростей звеньев стана.

- В результате экспериментальных исследований установлено, что шевингование зубьев накатников уменьшает их погрешности с IО-II степени до 7-8 степени по ГОСТу I643-72, при этом шероховатость рабочих поверхностей зубьев понижается на один класс и существенно сближаются направления следов их обработки и скольжения металла при зубонакатывании. Кинематическая точность зубчатых колёс, накатанных шевингованными накатниками повысилась, так среднее колебание длины общей нормали уменьшилось на 18%, а погрешность размера по ролику на 20%. Шевингование зубонакатников позволяет простым способом улучшить профиль их зубьев. Средняя величина полной мощности зубонакатывания шевингованными накатниками уменьшилась на I0-I2%.

- На основании проведенных исследований установлено, что при растачивании отверстия на первой операции механической обработки накатанных зубчатых колёс базами должны служить эвольвентные поверхности зубьев.

Предложена теоретическая зависимость погрешности центрирования накатанных зубчатых колёс в трехкулачковом, шестирроликовом патроне с самоустанавливающимися роликами, выражающаяся степенной функцией величины некруглости "базового контура" и угла расположения базовых роликов одного кулачка. Исследование теоретической зависимости показывает, что для получения минимальной погрешности центрирования колеса необходимо располагать базовые ролики с возможно большим углом между собой в пределах

$$\frac{\pi}{2} .$$

Экспериментальное исследование трехшлицевого, шестироликового патрона с самоустанавливающимися роликами, имеющими угол расположения между собой  $26^{\circ}40'$  показало, что среднее радиальное биение накатанных зубчатых колёс после растачивания всего на 0,02 мм больше вероятного среднего радиального биения, определенного на основе статистического анализа обработки многих партий деталей. При базировании в предложенном патроне радиальное биение колёс уменьшено в 1,9 раза по средним значениям в сравнении с базированием по поверхности впадин зубьев.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Белькорецкий Н.Л. Изготовление крепномодульных шестерен прокаткой зубчатого венца. В сб. "Технология машиностроения", М, ЦИТИАМ, 1963, № 11.
2. Белькорецкий Н.Л., Сумин А.И. Изготовление зубчатых колёс с накатанными зубьями. Тракторы и сельхозмашины, 1971, № 9.
3. Белькорецкий Н.Л., Сумин А.И., Васильчиков М.В., Виноградова М.Д. О работоспособности зубчатых колёс, изготовленных способом горячего накатывания. Вестник машиностроения, 1973, № 1.
4. Белькорецкий Н.Л., Сумин А.И. Комплексный технологический процесс изготовления шестерен с применением горячей прокатки зубьев. В сб. "Технология, экономика и организация производства". М, МИНСЕЛЬХОЗМАШ, 1977, № 2.
5. Васильчиков М.В., Белькорецкий Н.Л., Капитонов И.М., Сумин А.И. Влияние биения заготовки зубчатых колёс на точность процесса накатки. Вестник машиностроения, 1977, № 6.
6. Сумин А.И., Белькорецкий Н.Л. Патрон для зажима цилиндрических зубчатых колёс с горячекатанными зубьями. Вестник машиностроения, 1978, № 12.
7. Белькорецкий Н.Л. Влияние погрешностей и шероховатости зубонакатных валков на точность накатанного зубчатого колеса. Вестник машиностроения, 1980, № 1.
8. Сумин А.И., Несен Э.И., Белькорецкий Н.Л., Хазин С.М. Способ прокатки цилиндрических зубчатых колёс. А.С. № 497087 от 30.12.75 г.
9. Сумин А.И., Белькорецкий Н.Л., Купреев В.И., Хазин С.М. Способ изготовления цилиндрических зубчатых колёс. А.С.

№ 593792 от 25.02.78 г.

Ю. Сумин А.И., Белькорецкий Н.Л., Барбарич М.В., Капитонов  
И.М., Розенфельд М.Е., Лебедь Н.Н., Хазин С.М., Иoffe В.В.  
Способ прокатки зубчатых колёс и стан для его осуществления.  
А.С. № 732062 от 5.05.80 г.

Белькорецкий Наум Львович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ  
КОЛЕС С НАКАТЫВАНИЕМ ЗУБЬЕВ