

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР  
ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

**А.И.Голембиевский**

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Специальность 05.164-технология машиностроения

**Минск, 1970**

Работа выполнена в Калининградском техническом институте и в физико-техническом институте АН БССР.

Научный руководитель - академик АН БССР, доктор технических наук, профессор  
КОНОВАЛОВ Евмений Григорьевич

Официальные оппоненты- член-корреспондент АН БССР,  
доктор технических наук, профессор ЯЩЕРИЦЫН Петр Иванович  
- кандидат технических наук, доцент СИДОРЕНКО Юрий Алексеевич

Ведущее предприятие - Калининградский завод "Автозапчасть".

Автореферат разослан "... " ..... 1970г.

Защита диссертации состоится "...."..... 1971г.  
на заседании Объединенного Ученого Совета СФТИ в Большом конференц-зале АН БССР по адресу: Ленинский проспект, 66.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АН БССР.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета и прислать свои отзывы (в двух экземплярах), заверенные печатью учреждения, по адресу: "Минск, Подлесная, 25, ФТИ АН БССР, Ученому секретарю Объединенного Ученого Совета,

Ученый секретарь  
кандидат технических наук

Т.В. КАЛИНОВСКАЯ

## В В Е Д Е Н И Е

В решениях Коммунистической партии и Советского правительства по дальнейшему развитию народного хозяйства большое внимание уделяется вопросам повышения мощности и производительности машин, их надежности и долговечности, точности и улучшению товарного вида машиностроительной продукции. В свете этих решений существенно возрастает роль отделочных операций при обработке деталей машин.

Одним из наиболее эффективных процессов окончательной обработки является метод поверхностного пластического деформирования (ППД) микронеровностей, сочетающий как технологические и эксплуатационные достоинства (чистота обработки V 11 - V 12, упрочнение поверхностного слоя на глубину до 20 мм, повышение износостойкости поверхности в 1,5 - 3,0 раза, повышение прочности при знакопеременных нагрузках в 2 - 3 раза и т.п.), так и высокие экономические показатели.

Успешные научные изыскания советских и зарубежных авторов привели к широкому распространению обработки деталей машин ППД. Однако, несмотря на значительные достижения, эту проблему нельзя считать полностью исчерпанной, так как имеется еще много нерешенных задач. В частности подавляющее большинство исследований посвящено чистовой и отделочно-упрочняющей обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей вращения. В то же время недостаточно мало работ по обработке ППД фасонных поверхностей, среди которых значительную группу составляют сферические поверхности (шаровые пальцы и опоры, сферические вкладыши подшипников, сферические сосуды и т.п.). Это сдерживает более широкое внедрение безусловно прогрессивного метода окончательной обработки деталей машин.

В реферируемой диссертации решены основные вопросы чистовой и упрочняющей обработки ППД сферических поверхностей. Причем главное внимание уделено поверхностям большего диаметра.

Основным содержанием выполненной работы является разработка научно обоснованных методик структурного и сравнительного анализов способов ротационной обработки деталей машин на примере сферических поверхностей. Создание на основе этих методик устройств для накатывания сферических поверхностей, не уступающих по простоте реализации и эффективности наиболее совершенным способам накатывания цилиндрических поверхностей. Исследование влияния конструктивных и технологических параметров процесса обкатывания с самоподачей на качественные характеристики поверхностного слоя обработанной детали.

На базе выполненных исследований разработана методика проектирования технологических процессов ротационной обработки сферических поверхностей.

## СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Из выполненного обзора способов обработки ППД сферических поверхностей видно, что в технологии ротационной обработки уже создано значительное количество способов, которые можно использовать для решения одной и той же технологической задачи. Поэтому при проектировании технологических процессов часто приходится выбирать наиболее эффективный способ решения поставленной задачи в конкретных условиях производства.

Это обуславливает необходимость в анализе, который позволил бы объективно решать не только частные вопросы выбора наиболее эффективных способов обработки для отдельно конкретных случаев, но и создать систему, определяющую сущность и место каждого способа в общем комплексе известных и возможных новых схем обработки, и определять рациональную область применения этих способов. Для создания такой системы необходимы общий подход и методика структурного анализа и классификация способов ротацион-

ной обработки на основе наиболее существенных признаков последних. В основу этой методики положен принцип количественной оценки сложности реализации различных схем обработки.

Для реализации любой схемы обработки оборудованию (например, станку) необходима определенная механика, то есть совокупность устройств и механизмов для базирования заготовки и сообщения ей и инструменту надлежащих абсолютных движений.

Абстрагируясь от конкретных конструкций установочных приспособлений, материализующих основные базы детали, будем понимать под механикой технологической структуры станка множество всех установочных элементов, обеспечивающих определенность базирования детали при ее обработке.

$$M_T = \bigcup_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

где  $M_T$  - механика технологической структуры станка;  $T_i$  - технологический комплекс, обеспечивающий определенность базирования.

Механизмы, сообщающие заданные абсолютные движения заготовке и инструменту составляют механику кинематической структуры станка. Эти механизмы делятся на два класса. Первый класс составляют различного рода направляющие устройства, обеспечивающие заданный вид траектории движения инструмента и заготовки. Их совокупность называется направляющим комплексом (Н). Ко второму классу относятся различные механизмы, передающие заготовке и инструменту энергию для сообщения им движения. Совокупность этих механизмов называется энергетическим комплексом (Э).

Следовательно, кинематическая структура станка представляет собой вполне определенное множество направляющих и энергетических комплексов. Составляющие его подмножества суть механика отдельного движения инструмента или заготовки, задаваемого схемой обработки

$$M_K = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2)$$

где  $M_K$  - механика кинематической структуры станка;  
 $M_i$  - механика отдельного движения инструмента или заготовки.

В свою очередь, кинематическая структура каждого отдельного движения является совокупностью направляющего и энергетического комплексов

$$M_i = h_i U \mathcal{E}_i \quad (3)$$

Таким образом, полную механику устройства или станка можно рассматривать как совокупность технологической и кинематической механик

$$M_C = M_T U M_K \quad (4)$$

Для сравнения сложности различных способов обработки поверхностей одного вида предложен критерий сложности станка, реализующего данный способ обработки

$$S_C = Q_T + Q_H + Q_E \quad (5)$$

где  $S_C$  - критерий сложности станка;  $Q_T$  - количество отдельных базирующих комплексов;  $Q_H$  - количество направляющих комплексов;  $Q_E$  - количество энергетических комплексов.

Очевидно, минимальный критерий  $S_C$  характеризует собой наиболее простой способ обработки.

Оценка различных способов обработки критерием позволяет наметить пути уменьшения сложности реализации этих способов и тем самым создавать новые способы обработки. Из выражения (4) видно, что эту задачу можно решить двумя путями: совмещением технологических комплексов с одним из кинематических; уменьшением сложности технологической и кинематической механик станка.

Разработанная методика применена для классификации и структурного анализа всех известных способов ротационной обработки наружных сферических поверхностей (таблица 1).

Проведенный анализ (табл. 1) показал, что наиболее просты в реализации способы полно контактного обкатывания по схемам с упрощенной механикой (схемы 9 и 10). Этим объясняется их широкое использование в производстве для обработки поверхностей небольшой протяженности. Несколько уступают им способы неполноконтактного обкатывания по схемам с упрощенной механикой (схемы 7 и 11). Однако эти схемы обработки имеют важное преимущество перед полноконтактными, так как позволяют выполнять накатывание сферических поверхностей большого диаметра.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Структурный анализ и классификация способов ротационной обработки количественно определяют сложность реализации той или иной схемы.

Другим не менее важным аспектом, дающим путевку в производство любому способу обработки, является производительность. Однако сама по себе абсолютная производительность еще не отражает эффективности конкретного способа обработки. Поэтому, разработана методика сравнительного анализа, позволяющая рассматривать производительность любого способа обработки не абстрактно, а в сравнении с производительностью всего комплекса известных способов обработки поверхностей одного вида. Эта методика включает в себя кинематический анализ параметров процесса, вывод через эти параметры времени выполнения одного перехода и собственно сравнительный анализ производительности различных способов обработки по основному технологическому (машинному) и штучному времени.

Таблица 1

## Классификация способов ротационной обработки наружных сферических поверхностей

## ЦЕНТРОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ

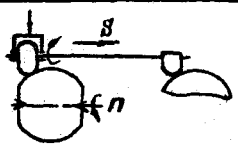
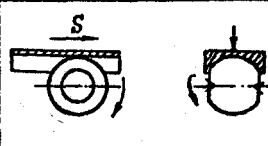
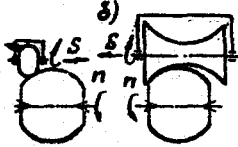
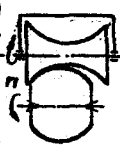
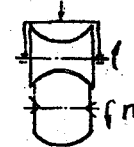
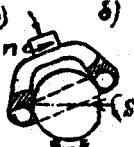
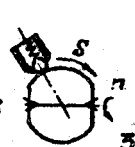
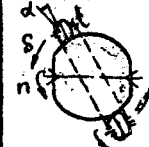
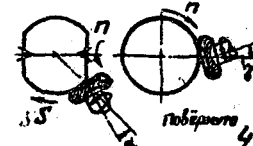
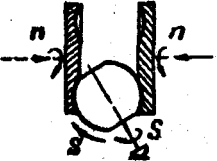
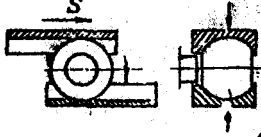
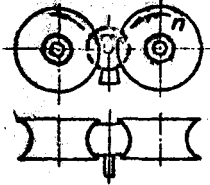
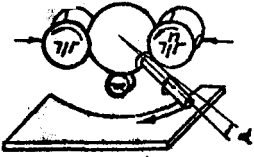
Способы обработки по схеме с раздельным приводом						Способы обработки по схеме с упрощенной механикой					
ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА	$Q_H$	$Q_Э$	Крит. сложности			ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА	$Q_H$	$Q_Э$	Крит. сложности		
			$S_T$	$S_K$	$S_C$				$S_T$	$S_K$	$S_C$
 1	2	2	3	2	5	 5	1	1	2	1	3
а)  б)  2	а) 2 б) 2	2 2	2 2	2 2	4 4	 6	1	1	2	1	3
а)  б)  3	а) 2 б) 2	2 2	2 2	2 2	4 4	 7	1	1	2	1	3
 4	2	2	2	2	4						



Таблица 1 ( продолжение )

БЕСЦЕНТРОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ

Способы обработки по схеме с раздельным приводом						Способы обработки по схеме с упрощенной механикой					
ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА	$Q_H$	$Q_Э$	Крит. сложности			ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА	$Q_H$	$Q_Э$	Крит. сложности		
			$S_T$	$S_K$	$S_C$				$S_T$	$S_K$	$S_C$
 <p>8</p>	1	4	1	4	5	 <p>9</p>	1	1	0	1	1
b						 <p>10</p>	1	1	1	1	2
						 <p>11</p>	1	1	2	1	3

В качестве основного сопоставимого критерия (критерия разрешающей способности при ротационной обработке) предложен критерий расчетной чистоты обработки поверхности, достигаемой в рассматриваемом способе. Это позволяет расчетным путем определить производительность любого процесса обработки при заданной чистоте поверхности, а, следовательно, и объективно сравнить между собой различные способы ротационной обработки.

Согласно разработанной методики, основное технологическое время выполнения одного перехода определяется непрерывной функцией параметров процесса

$$t_0 = \frac{1}{v} f(A) \quad (6)$$

где  $t_0$  - основное технологическое время выполнения одного перехода;  $v$  - расчетная чистота обработки;  $v$  - скорость обработки.

Сравнение производительности по основному времени двух любых способов обработки поверхностей одного вида, при условии достижения одинаковой чистоты обработки, осуществляется по уравнению вида

$$\frac{t_{01}}{t_{02}} = \frac{v_1}{v_2} f(B, C, D \dots) \quad (7)$$

От сравнения производительности по основному времени можно перейти к сравнению по штучному времени. Для этого используется уравнение

$$\frac{t_{wr1}}{t_{wr2}} = \frac{1,08(t_{01} + t_{s1})}{1,08(t_{02} + t_{s2})} \quad (8)$$

где  $t_s$  - вспомогательное время.

Конкретизация зависимостей (6,7,8) выполнена для способов неполноконтактной обработки сферических поверхностей, охваченных классификацией (таблица 1).

Проведенный сравнительный анализ показал, что наибольшей производительностью по основному времени обладают способ планетарного обкатывания (схема 3а), способ обкатывания с выглаживанием (схема 8) и бесцентровой способ обкатывания с самоподачей детали (схема 11). Причем способ обкатывания по схеме 11 превосходит все другие способы по производительности, определяемой штучным временем.

Таким образом, по результатам структурного и сравнительного анализов способов обкатывания сферических поверхностей, наиболее эффективным является способ обработки по схеме с самоподачей. Этот способ изучен недостаточно, а практические рекомендации по его внедрению вообще не разработаны. Именно поэтому последующие разделы диссертации посвящены всестороннему исследованию данного способа ротационной обработки.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА БЕСЦЕНТРОВОЙ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С САМОПОДАЧЕЙ

Исследовалась зависимость основного показателя качества обработанной поверхности - чистоты обработки от различных технологических и конструктивных параметров; усилия обработки, технологического натяга, числа проходов, скорости обкатки и самоподачи, исходной шероховатости поверхности, диаметра обрабатываемой поверхности и формы профиля деформирующего ролика.

Исследование проводилось на токарном станке 1К62, оснащенный сферообкатным устройством. Однако первоначальная "классическая" схема устройства (схема 11 по таблице 1) была качественно улучшена. Так опорный ролик 4 (рис. 1) получил дополнительную степень свободы (вращение в плоскости самоподачи). Это позволило устранить вредное влияние трения верчения в зоне контакта опорного ролика и

заготовки на качество обработки.

В экспериментах использовались ролики двух типов. При обкатывании вязких материалов рабочая поверхность роликов (рис. 2а) очерчена дугой окружности, радиус которой равен или несколько больше половины диаметра заготовки ("классический" профиль). При обкатывании твердых и термообработанных сталей рабочая поверхность роликов (рис. 2б) очерчена дугами двух окружностей. Радиус одной из них равен половине диаметра детали, а радиус другой несколько больше. Такое решение позволило разделить зону обработки на деформирующую и калибрующую, что заметно повысило качество обкатанной поверхности.

Замер усилий осуществлялся камертонным динамометром (ориентировочно) и специально сконструированной тензометрической головкой (точно), сигналы которой регистрировались шлейфным осциллографом Н700.

Испытуемые образцы из сталей 40Х и 12ХНЗА диаметром 40 - 100 мм обтачивались на токарном станке, оснащем сферообтачивающим устройством, до чистоты поверхности  $\nabla 4 - \nabla 6$ .

Шероховатость исходной и обкатанной поверхности образцов контролировалась микроскопом МИ-7 и профилографом - профилометром Калибр-ВЗИМ.

По результатам исследования построены графики изменения чистоты поверхности при изменении параметров процесса.

Анализ полученных результатов показал следующее.

Способ ротационной обработки сферических поверхностей с самоподачей обеспечивает получение высоких классов чистоты поверхности ( $\nabla 8 - \nabla 11$ ) в широком диапазоне изменения технологических параметров и пригоден для отделочной обработки поверхностей большого диаметра.

Основными факторами, обеспечивающими высокий класс чистоты обработки, являются удельное давление на поверхности контакта детали и ролика, кратность приложения нагрузки и скорость самоподачи.

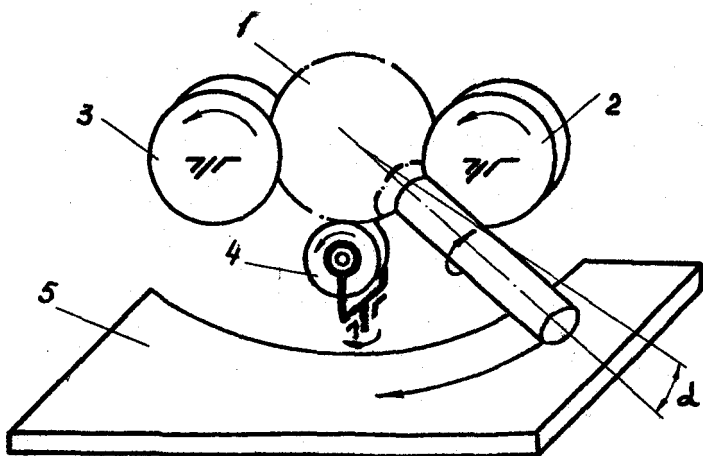


Рис.1. Схема устройства для бесцентрового накатывания сферических поверхностей

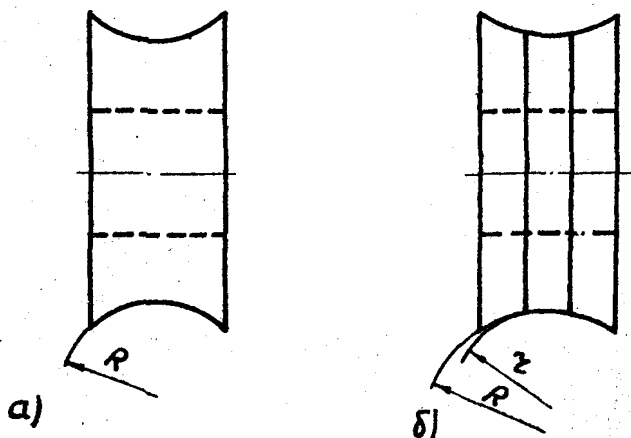


Рис. 2. Накатные ролики

а) классический; б) с заборной и калибрующей поверхностями

Процесс обкатывания из-за отсутствия отдельного механизма подачи сопровождается проскальзыванием, что обеспечивает наряду с обжатием поверхности еще и заметное выглаживание. Величина проскальзывания, а, следовательно, и выглаживания регулируется натягом.

Результаты технологического исследования качественно хорошо согласуются с данными других авторов по исследованию обработки ППД поверхностей других видов. Определенные количественные отличия объясняются особенностями исследованного способа ротационной обработки.

#### ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ С САМОПОДАЧЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТАЛИ

Исследовалось изменение твердости поверхностного слоя, глубина проникновения наклепа, остаточные напряжения и износостойкость поверхности в зависимости от изменения параметров процесса.

Исследование изменения твердости и глубины наклеванного слоя проводилось методом измерения твердости на косых срезах. Уклон среза был принят 1:20. Измерения производились при нагрузке 5 кг на твердомере ТП (типа Виккерс).

По результатам измерений построены графики изменения абсолютной твердости поверхности в зависимости от усилия обработки и относительный прирост твердости, графики распределения твердости по сечению поверхностного слоя при различном усилии и числе проходов, графики зависимости глубины наклепа от усилия обработки при различных диаметрах детали и соответственно при различных профильных радиусах деформирующих роликов.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

Твердость обкатанной на оптимальных режимах поверхности повышается на 15-20 процентов. Больше повышение

твердости отмечено у образцов из стали 12ХЗЛ и меньшее у стали 40Х.

Наибольшая абсолютная твердость отмечена на расстоянии 0,2-0,3 мм от поверхности.

Твердость, измеренная на поверхности, практически не зависит от усилия обработки и числа проходов. Падение твердости на поверхности объясняется перенаклепом металла.

Закон изменения глубины наклепа очень хорошо согласуется с известной формулой профессора И.В. Кудрявцева и Г.Е. Петушкова

$$a = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (9)$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от приведенного радиуса кривизны обкатываемой поверхности и деформирующего ролика;  $P$  – усилие обработки;  $\sigma_T$  – предел текучести металла детали.

Остаточные напряжения исследовались методом травления симметричных колец шириной 6 мм, вырезанных из обкатанных сферических образцов. Вычисления остаточных напряжений выполнялось по методу академика Н.Н. Давиденкова.

По результатам исследования построены эпюры остаточных напряжений в зависимости от удельного давления при обкатке и кривые изменения остаточных напряжений в зависимости от скорости самоподачи при постоянном усилии обработки.

Анализ полученных результатов показал, что в поверхностном слое обкатанных сферических образцов возникают благоприятные остаточные сжимающие напряжения. По мере повышения удельного давления от минимального до определенного предела происходит как возрастание абсолютного значения, так и глубины их распространения. Дальнейшее повышение удельного давления снижает величину напряжений сжатия у поверхности и смещает их максимум в глубину поверхностного слоя.

Опыты по выявлению влияния скорости обкатывания на величину и глубину распространения остаточных сжимающих напряжений не выявили заметного изменения последних при изменении скорости обработки.

Определенное влияние на величину остаточных напряжений оказывает скорость самоподачи. Было отмечено, что при удельных давлениях порядка  $2000 \text{ н/мм}^2$  максимум напряжений соответствует величине самоподачи равной  $1,5 \text{ мм/об}$ . При дальнейшем увеличении самоподачи остаточные напряжения монотонно уменьшаются.

Испытания на износ проводились по схеме трения вкладыша о вращающийся ролик (испытуемый образец) в условиях полужидкостного трения. Образцы шириной  $10 \text{ мм}$  вырезались из обкатанных заготовок.

Для сравнения износостойкости были испытаны также образцы, обкатанные выпуклым роликом по схеме с круговой подачей ролика, и шлифованные образцы.

По результатам испытания построены кривые износы образцов, обработанных сравниваемыми способами до одинаковой чистоты поверхности.

Результаты испытания показали, что установившийся износ шлифованных образцов в  $1,7 - 2,0$  раза, а обкатанных выпуклым роликом в  $1,1 - 1,3$  раза больше, чем обкатанных вогнутым роликом по схеме с самоподачей. Это объясняется формой профиля еденичной микронеровности обработанной поверхности. У образцов, обкатанных вогнутым роликом он более устойчив к истиранию, так как представляет собой выпуклый треугольник с углом при вершине порядка  $115 - 130$  градусов.



## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Выполненные исследования позволили решить ряд важных проблем, связанных с разработкой технологии ротационной обработки сферических поверхностей большого диаметра.

Разработана методика аналитического определения основного настроечного параметра - технологического натяга. Эта методика учитывает сопутствующие процессу обкатки упругие деформации обрабатываемой детали и деформирующих элементов.

Согласно этой методике

$$\Delta d = i + 2W \quad (10)$$

где  $\Delta d$  - технологический натяг;  $i$  - остаточная деформация (величина обжатия) на диаметр;  $W$  - суммарная упругая деформация обрабатываемой детали и деформирующего элемента.

Величина обжатия определяется по известной формуле

$$i = 2f(R_z - R'_z) \quad (11)$$

где  $f$  - коэффициент, зависящий от диаметра обкатываемой поверхности и способа предварительной обработки ( $f = 1,3 - 1,5$ );  $R_z$  - исходная шероховатость;  $R'_z$  - окончательная шероховатость, соответствующая нижнему пределу требуемого класса чистоты.

Суммарная упругая деформация определяется по формулам теории упругости.

Разработана методика определения площади поверхности контакта обкатываемой детали и деформирующего элемента. При этом сделано следующее допущение. Абсолютно жесткие микронеровности, расположенные с постоянной плотностью на контурной поверхности деформирующего элемента, в процессе

контактирования полностью внедряются в пластически деформируемый металл обкатываемой поверхности.

Для решения вопроса о форме единичной микронеровности рабочей поверхности деформирующего элемента, проведено экспериментальное исследование роликов, обработанных различными методами. Результаты этого исследования позволили моделировать рабочую поверхность ролика набором эллипсоидов.

Разработанная методика применена для вывода уравнения поверхности контакта обкатываемой сферы и вогнутого ролика.

$$F = \frac{2}{3} \left[ \sqrt{\Delta d (R_d + \Delta R)} + 0,5 s \right] \times$$

$$\times \left[ \sqrt{\frac{2R_p s}{R_p + R_d} (2\sqrt{\Delta d (R_d + \Delta R)} - s)} + \sqrt{\frac{2R_p R_d}{R_p + R_d} W} \right] \times$$

$$\times \left[ \sqrt{1 - \epsilon^2} + \frac{\arcsin \epsilon}{\epsilon} \right] \quad (12)$$

где  $F$  - площадь поверхности контакта обрабатываемой детали и деформирующего ролика;  $R_d$  - радиус детали;  $\Delta R$  - приращение профильного радиуса ролика;  $R_p$  - радиус ролика;  $s$  - скорость самоподачи;  $\Delta d$  - технологический натяг;  $W$  - суммарная упругая деформация детали и ролика;  $\epsilon$  - эксцентриситет основания единичной микронеровности рабочей поверхности ролика.

Разработана общая методика проектирования технологических процессов ротационной обработки. Согласно этой методике, технологический натяг и площадь поверхности контакта детали и деформирующего ролика определяются по уравнениям (11 и 12).

Эта методика учитывает требуемую точность (допустимую погрешность) обработки. Поэтому скорость подачи, оказывающая весьма существенное влияние на другие параметры процесса, связана с жесткостью технологической системы

СПИД и погрешностью обработки.

Исходя из этого, выведено расчетное уравнение, связывающее погрешность обработки с параметрами процесса.

$$\Delta h = \frac{1}{16} q F \left( \frac{3l^2}{16EJ} + \frac{j_A + 9j_B}{j_A \cdot j_B} + \frac{j_C + 9j_D}{j_C \cdot j_D} \right) \quad (13)$$

где  $q$  - удельное давление;  $F$  - площадь поверхности контакта;  $j_A, j_B, j_C, j_D$  - жесткость опор валов;  $J$  - момент инерции валов;  $E$  - модуль упругости металла валов.

Для случая ротационной обработки сферической поверхности по схеме с самоподачей на резьбонакатном станке GWR - 80, оснащенном сферообкатным устройством по рис. 1, по полученному уравнению построен график для определения самоподачи в зависимости от требуемой точности обработки.

Разработанная методика применена при проектировании технологического процесса обкатывания пальца рулевого управления электропогрузчика ЭП-01.

### ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С САМОПОДАЧЕЙ

На Калининградском заводе "Автозапчасть" изготовлен и используется с 1966 года станок для накатывания шарового пальца реактивной штанги автомобиля ЗИЛ-151. Его внедрение позволило устранить три операции при обработке сферы, в несколько раз снизить трудоемкость изготовления детали и повысить ее износостойкость не менее чем в два раза.

Общий годовой экономический эффект по заводу и сфере использования составил 160 тысяч рублей (по А. И. Фломенблиту).

На Калининградском вагоностроительном заводе внедрено накатывание пальца рулевого управления электропогрузчика ЭП-01 на резбонакатном станке GWR - 80, оснащенном сферообкатным устройством по схеме с самоподачей детали.

## З А К Л Ю Ч Е Н И Е

1. На основании выполненного критического обзора известных способов ротационной обработки сферических поверхностей выявлено заметное отставание обработки ППД поверхностей этого вида.

Показана непригодность схем полноконтakтного накатывания для обработки сфер большого диаметра.

Отмечены недостатки способов, пригодных для обработки поверхностей большого диаметра.

Выполнена разработка устройств и деформирующих элементов, реализующих способ накатывания сферических поверхностей с самоподачей. Некоторые из этих разработок признаны изобретениями.

2. На основе некоторых положений теории множеств разработана методика структурного анализа и классификации способов ротационной обработки поверхностей различного вида. Эта методика применена для классификации и структурного анализа способов обкатывания наружных сферических поверхностей.

3. Разработана методика сравнительного анализа производительности по основному и штучному времени, при условии получения одинакового класса чистоты, способов обработки ППД поверхностей различного вида. Методика применена для анализа способов ротационной обработки сферических поверхностей.

4. Классификация, структурный и сравнительный анализы способов обкатывания сферических поверхностей позволили сделать вывод о значительной прогрессивности бесцентрового способа ротационной обработки сферических поверхностей

с круговой самоподачей. Поэтому этот способ был подвергнут всестороннему исследованию.

5. Разработана экспериментальная установка для технологического исследования.

Исследованы закономерности изменения чистоты поверхности в зависимости от технологических и конструктивных параметров процесса.

По результатам исследования установлено, что при обкатывании сферических поверхностей большого диаметра достигается высокий класс чистоты обработки (V8 - V11) и высокая производительность (порядка 10 - 12 деталей в минуту), обуславливаемая большими значениями самоподач (1 - 5 мм/об) и малыми затратами вспомогательного времени на установку и снятие детали.

6. Исследовано изменение физико-механического состояния поверхностного слоя обкатанной детали.

В результате установлено, что при обкатывании на режимах рекомендуемых для ротационной обработки, глубина наклепа достигает двух миллиметров, при значительном повышении твердости. В наклепанном слое возникают благоприятные остаточные напряжения сжатия. Износостойкость обкатанной поверхности возрастает по сравнению со шлифованной примерно в два раза.

7. По результатам выполненных исследований разработана методика проектирования технологических процессов ротационной обработки сферических поверхностей с самоподачей.

8. Производственное использование способа ротационной обработки с самоподачей показало достаточно высокую его эффективность.

9. По результатам выполненной работы прочитаны доклады на всесоюзной научно-технической конференции по упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработке деталей, состоявшейся в Ростове-на-Дону в ноябре 1970г», и на ежегодных научно-технических конференциях Калининградского технического института в 1969 и 1970 г.г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Е.Г. Коновалов, А.И. Фломенблит, А.И. Голембиевский. Отделочно-упрочняющая обработка шаровых поверхностей. "Машиностроитель", 1969, № 2.
2. Е.Г. Коновалов, А.И. Фломенблит, А.И. Голембиевский и др. Отделочно-упрочняющая обработка методом поверхностного пластического деформирования на Калининградском заводе "Автозапчасть". В сб. "Технология машиностроения", Калининград, 1969.
3. Е.Г. Коновалов, А.И. Фломенблит, А.И. Голембиевский. К исследованию кинематики накатывания шаровой поверхности с самоподачей. В сб. "Технология машиностроения", Калининград, 1969.
4. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. Накатывание сферических деталей. "Машиностроитель", 1969, № 8.
5. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. Накатной ролик. Решение о выдаче авт.свид. по заявке № 1379969/25-8, кл.67а, 12 от 20 апреля 1970г.
6. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. Определение нормальных усилий и подач с учетом заданной точности при накатывании шаровых поверхностей с самоподачей. "Известия ВУЗов, Машиностроение", 1970, № 3.
7. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский, Г.Б. Файнберг. Отделочно-упрочняющая обработка шаровых поверхностей. "Станки и инструмент", 1970, № 8.
8. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. Устройство для упрочняющей обработки наружных неполных сферических поверхностей. Авт.свид. № 280260, кл.67а, 12, 1970, № 27.
9. Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский, Ю.К. Моисеенков. Размерно-чистовая упрочняющая обработка шаровых деталей большого диаметра. В сб. "Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей". Ростов-на-Дону, 1970.