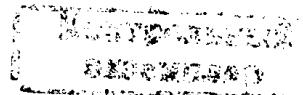


05.03.01  
С 217



На правах рукописи

Сафин Василь Нургалеевич

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МИКРОМЕТРИЧЕСКИХ НУТРОМЕРОВ  
НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ  
ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
СТЕРЖНЕЙ

Специальность 05.03.01 –  
“Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки”

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор Щуров И.А.

Научный консультант — кандидат технических наук,  
доцент Иоголевич В.А.

Официальные оппоненты: — доктор технических наук,  
профессор В.И. Гузеев;  
— кандидат технических наук,  
доцент В.И. Сурков.

Ведущее предприятие — ЗАО Челябинский инструментальный завод (ЧИЗ).

Защита диссертации состоится "21" декабря 2001 г., в 12 ч,  
на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 Южно-Уральского го-  
сударственного университета по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.  
Ленина, 76, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского  
государственного университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" ноября 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета А.Г.Андронов ~ В.В.Ерофеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В машиностроении для определения размеров деталей применяются микрометрические инструменты: нутромеры; гладкий, листовой, трубный микрометры; глубиномеры. В этих инструментах используют установочные меры, удлинители, различного рода вставки. Такие детали должны выполняться с высокой точностью, что определяет трудоемкость изготовления инструментов, ограничивает сроки их эксплуатации. Так, при подборе комплекта удлинителей, на окончательной стадии изготовления нутромера, приходится присоединять один, затем другой, третий и так далее удлинители из партии изготовленных удлинителей и производить измерения основной погрешности этой сборки на измерительной машине. Перед измерением основной погрешности, чтобы исключить погрешность от температурной деформации, необходимо сборку микроголовки и удлинителя выдержать определенное время для выравнивания температуры нутромера с температурой измерительной машины. Если на любом этапе подбора удлинителей требований по точности собранного нутромера не соответствуют ГОСТ 10-88, то приходится начинать подбор удлинителей начиная с первого. Так, по данным обследований, проведенных на Челябинском инструментальном заводе среднее время подбора удлинителей для одного комплекта нутромера НМ-1250 составляет 20 - 30 минут.

Устаревшая конструкция нутромеров и технология их изготовления обуславливают определенные требования к порядку соединения удлинителей при эксплуатации, которые оговариваются в Паспорте нутромера. Кроме того, следует также отметить, что удлинители разных комплектов нутромеров не взаимозаменяемые. Еще одним недостатком отечественных нутромеров является то, что по истечении определенного срока их точность снижается, хотя видимых признаков износа комплектующих элементов не наблюдается.

На ряде инструментальных заводов, используя достижения зарубежных фирм-изготовителей аналогичных инструментов, неоднократно пытались повысить точность и обеспечить стабильность размеров микрометрических инструментов. Зарубежные аналоги нутромеров имеют некоторые конструктивные отличия, например, один из торцев их стержней плоский. Попытки применить такую конструкцию стержней в отечественном нутромере НМ-1250 успеха не имели. Причиной этого следует считать отсутствие необходимых теоретических разработок и методик проектирования нутромеров. С другой стороны, на существующем отечественном оборудовании не удается получить стержни нутромеров с плоскими торцами, имеющими требуемые отклонения от перпендикулярности их осям, для опытной проверки этого модифицированного (выдоизмененного) инструмента.

Таким образом, разработка методики проектирования микрометрических инструментов, совершенствование их конструкции и создание оборудования для производства новых нутромеров является актуальной задачей инструментальной промышленности.



**Цель работы.** Повышение качества микрометрических нутромеров на основе совершенствования методики их проектирования – путем создания математической модели основной погрешности нутромера, учитывющей геометрические, физические и временные факторы, а также путем разработки технологического оборудования для изготовления измерительных стержней.

**Задачи исследования.**

1. Разработать математическую модель основной погрешности микрометрических нутромеров, включающую геометрические, физические и временные факторы, и произвести опытную проверку математической модели.
2. Разработать методику проектирования микрометрических нутромеров и на ее основе спроектировать и изготовить новую конструкцию нутромера.
3. Разработать и изготовить оборудование для производства новой конструкции нутромера.
4. Внедрить результаты исследований в действующее производство.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в созданной математической модели основной погрешности микрометрических нутромеров, включающей геометрические, физические, (силовые, температурные) и временные факторы, действующие при изготовлении и эксплуатации, а также в разработке на основе указанной математической модели новой запатентованной конструкции нутромера.

**Автор защищает** математическую модель основной погрешности микрометрических нутромеров, созданную с учетом минимизации этих погрешностей, прогрессивную конструкцию инструментов и новое оборудование для их изготовления.

**Научная ценность работы** заключается в решении задачи определения точности многозвенных инструментов с учетом геометрических, физических (силовых, температурных) и временных факторов действующих при изготовлении и эксплуатации модернизированных нутромеров.

**Практическая ценность работы** заключается в созданной методике проектирования микрометрических нутромеров, разработанной на этой основе новой конструкции нутромера, в созданном оборудовании для обработки плоских торцевых поверхностей стержней, обеспечивающем их высокую точность.

**Методика исследований.** Исследования выполнены с использованием основ теории проектирования мерительных инструментов, теории точности механизмов, теории контактных деформаций, метода конечных элементов, металлографического и размерного анализов. Проверка теоретических положений производилась путем сравнения результатов расчетов с лабораторными данными и данным их производственных испытаний.

**Реализация работы.** Работа реализована в рамках договорной деятельности с Челябинским инструментальным заводом (ЧИЗ). Разработанная методика расчета и комплектования микрометрических инструментов внедрена в проектных подразделениях завода. Разработанные инструмент и станок для доводки плоского торца внедрены на ЧИЗе.

**Апробация работы.** Основные научные результаты докладывались на конференции II Международной специализированной выставки "Машиностроение, прогрессивные технологии" (Челябинск, 17-19 мая 1998г.) и научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск: ЧПИ, ЧГТУ, ЮУрГУ 1985-1999гг.)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 6 работ и получен патент Российской Федерации.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 238 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы, включающего 100 наименований, приложения. В работе имеется 81 рисунок и 13 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации отражено состояние вопроса, показаны трудности, возникающие при изготовлении и эксплуатации нутромеров, в частности, необходимость многократного подбора удлинителей при комплектовании инструментов (партия 20 – 25 шт, комплектуется в среднем 450 – 500 мин) и, как следствие, невзаимозаменяемость комплектов удлинителей разных нутромеров.

Микрометрический нутромер состоит из микрометрической головки, набора удлинителей и наконечника (рис.1).

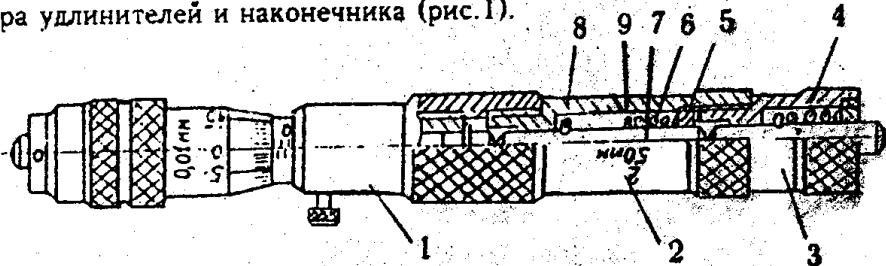


Рис.1. Нутромер НМ-1250: 1 – микрометрическая головка; 2 – удлинитель; 3 – наконечник; 4 – корпус; 5 – гайка крепежная; 6 – пружина; 7 – стержень измерительный; 8,9 – штифты

Удлинители и наконечник имеют одинаковую конструкцию и состоят из корпуса 2, 3, гайки крепежной 5 и измерительного стержня 7 с пружиной 6, предназначеннной для обеспечения надежного контакта сопрягаемых стержней. Пружина с одной стороны опирается на штифт 9, с другой – в гайку 5. Базирование стержней в корпусе осуществляется по поверхностям

отверстий в корпусе удлинителя и вворачиваемой в него гайке 5. Ограничение перемещения стержня осуществляется штифтами 8, 9. При соединении удлинителей стержни касаются между собой сферическими торцами. Длина стержней выполняется с точностью  $\pm 1,5$  мкм.

На окончательной стадии изготовления нутромера производится подбор комплекта. На этой операции к микрометрической головке присоединяют удлинители, указанные в комплекте поставки, и замеряют при помощи измерительной машины основную погрешность нутромера. Такая погрешность не должна превышать допускаемой предел, указанный в ГОСТ 10-88 (см. таблицу), на каждом диапазоне измерения.

### Допускаемые погрешности микрометрических нутромеров на различных диапазонах измерения (по ГОСТ 10-88)

Измеряемые размеры, мм	От 50 до 125	От 125 до 200	От 200 до 325	От 325 до 500	От 500 до 800	От 800 до 1250
Предел допустимой погрешности, мкм	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 20$

В работе приведены полученные диссидентом экспериментальные данные погрешностей измерительного размера нутромера во время его комплектования. Они показывают, что из-за больших величин основной погрешности собираемые комплекты нутромеров во многих случаях не соответствует требованиям ГОСТ 10-88. Поэтому приходится подбирать удлинители для каждого комплекта. После комплектования наносят на каждый удлинитель его порядковый номер в комплекте и номер самого комплекта, так как удлинители разных комплектов не взаимозаменяемы.

Известно, что погрешность нутромера складывается из погрешности головки и погрешности удлинителей. Поскольку погрешность головки остается постоянной на всем диапазоне измерений, то, очевидно, что необходимо прежде всего изучить влияние на погрешность нутромера различных погрешностей его удлинителей и их сборки. В работе рассмотрены теоретические аспекты данного вопроса.

Уменьшение погрешности измерительных инструментов и дальнейшее их совершенствование стало возможным благодаря работам Рубинова А.Д., Орлова П.Н., Маркова Н.Н., Сацердотова П.А., Кайнера Г.Б., Тайца Б.А. и других исследователей. В их работах приводятся данные о влиянии на погрешность измерения различных факторов: температуры, контактных деформаций и т.д. Однако данных, показывающих, как эти факторы проявляются в самих измерительных средствах, в литературе не приводится. Изучение технических требований на микрометрические инструменты других стран, например, Японии, Германии, где оговаривается погрешность нутромеров, показало их соответствие отечественным требованиям. Сходство

конструкций зарубежных и отечественных нутромеров позволяет предложить одинаковый уровень теоретических опытно-конструкторских работ в индустриально развитых странах.

Данные о погрешностях измерительных средств даются в официальных нормативных документах, где нормируется их предельная величина. Однако информация о том, какие факторы влияют на погрешности, как влияет конструкция самого инструмента, а также технология изготовления его отдельных деталей, в имеющихся литературных источникам выявить не удалось.

Для определения причины неудовлетворительного состояния комплектования нутромеров были проведены предварительные исследования по определению прямолинейности оси нутромера, биению корпусов удлинителей в сборке, технологических особенностей и т.д. Исследования показали: отклонение от соосности стержней и корпуса достигает 0,2..0,4 мм, оси контактирующих между собой стержней имеют отклонения от соосности 0,5...0,8 мм; конструктивные недостатки и недостатки технологии приводят к большой трудоемкости комплектования и исключают взаимозаменяемость удлинителей нутромера. В работе также установлено, что обнаруженные опытным путем значения основной погрешности нутромера не соответствуют данным полученным методами размерного анализа и, следовательно его использование недостаточно для определения основной погрешности микрометрического нутромера.

На основании вышеизложенного сделан вывод: конструкция, оборудование и технология производства микрометрических нутромеров не отвечает требованиям, предъявляемым сегодня к современным измерительным инструментам данного класса точности. Необходимо их совершенствовать и на основе учета основных факторов, обуславливающих погрешности нутромеров, а также определить степень влияния каждого из этих факторов.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели основной погрешности микрометрических нутромеров, учитывающей геометрические, физические и временные факторы, которые действуют во время изготовления и эксплуатации.

В реальном случае отрезок, соединяющий две наиболее удаленные (крайние) точки микрометрического винта головки и торца стержня наконечника (общий измерительный размер), будет отличаться от того же отрезка в идеальном случае (рис. 2). Разность длин этих отрезков и представляет собой основную погрешность нутромера:

$$\Delta L = MN - VW. \quad (1)$$

Стержни в нутромере могут устанавливаться произвольным образом в трехмерном пространстве. В работе показано, что целесообразно этот случай свести к плоскому, поскольку с точки зрения погрешности инструмента наихудший вариант будет, когда в одной плоскости наблюдается и

смещение стержней и их перекос. Учитывая, что стержни обязательно находятся в контакте друг с другом, можно принять такую сборку в нутромере как многозвездный механизм.

Известно, что функция положения на плоскости идеального звена механизма записывается в виде

$$L = F(l, \phi), \quad (2)$$

где  $l$ ,  $\phi$  — линейная и угловая координаты, характеризующие положение каждого из звеньев.

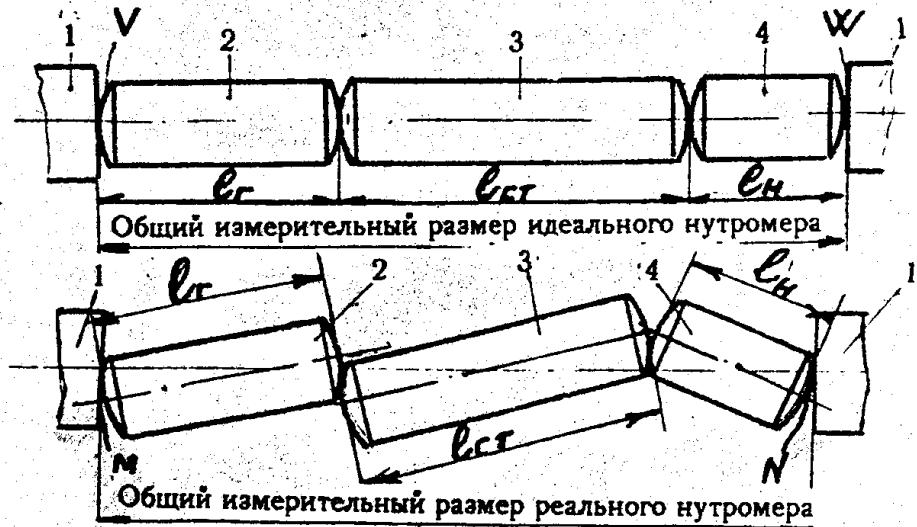


Рис. 2. Схема расположения микрометрической головки, измерительного стержня и наконечника при измерении:  
а) в идеальном случае; б) в реальном случае; 1 — наконечники инструмента; 2 — микрометрическая головка; 3 — измерительный стержень удлинителя; 4 — наконечник.

Приведенный в работе анализ взаимодействия стержней и функций положения позволил выявить следующие основные факторы, оказывавшие влияние на суммарную погрешность:

1. Геометрические ( $l_r$  — длина головки;  $l_i$  — длина  $i$ -го стержня;  $R$  — радиус сферы торца;  $U_i$  — отклонения от соосности стержней;  $d$  — диаметр стержня;  $\phi$  — угол между осями стержней).

2. Силовые ( $P$  — усилие со стороны пружины;  $m_i g$  — сила тяжести, действующая на стержень).

3. Температурные ( $t_0$  — нормированная температура измерения ( $20^\circ C$ );  $t_i$  — температура стержня в рассматриваемый момент времени;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала стержней).

4. Размерно-стабилизирующие ( $r$  — коэффициент структурных превращений материала стержней;  $t$  — время, прошедшее с момента термообработки стержней).

Для обеспечения точечного контакта стержни должны иметь или оба торца сферических, или один сферический, другой — плоский. Однако, до настоящего времени преимущества того или иного варианта не выявлено. Поэтому при разработке математической модели микрометрического нутромера были рассмотрены оба эти варианта.

*1. Торцы измерительных стержней — сферические.* Расчет производился в системе координат, связанной с головкой микронутромера (рис. 3). В этом случае общий измерительный размер, определяемый как отрезок  $M_n N_n$  для  $n$  стержней сборки нутромера, находят по формуле

$$M_n N_n = \left\{ \left\{ (l_r - 2R) + \sum_{i=1}^n \left[ (l_i - (R\varphi_i + U_i)/4R + (l_i - 2R) \cos \varphi_i) \cos \varphi_i^* - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - [U_i + (l_i - 2R) \sin \varphi_i] \sin \varphi_i^* \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. + \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ (l_i - (R\varphi_i + U_i)/4R + (l_i - 2R) \cos \varphi_i) \sin \varphi_i^* - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - [U_i + (l_i - 2R) \sin \varphi_i] \cos \varphi_i^* \right] \right\}^2 \right\}^{1/2} + 2R, \quad (3)$$

где  $\varphi_i^* = \sum_{i=1}^n \varphi_{i-1}$ ;  $\varphi_0 = 0$ .

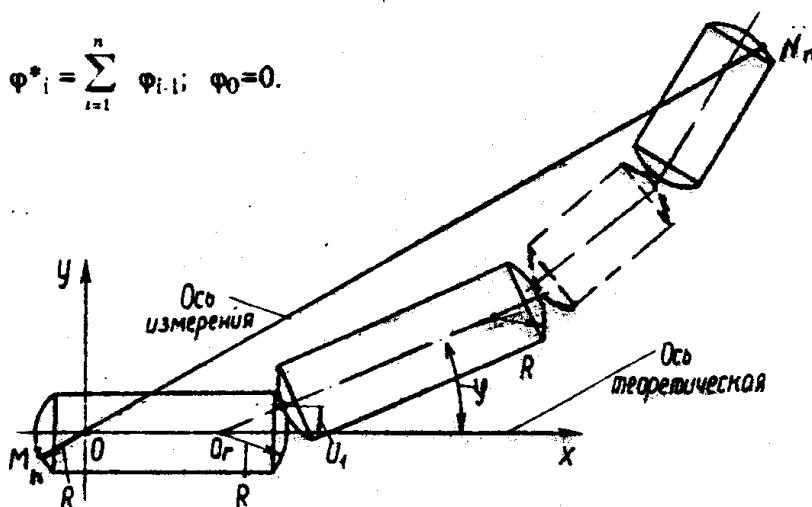


Рис. 3. Схема расположения в нутромере микрометрической головки и наконечника, имеющих оба сферических торца

Длина каждого из стержней, используемая в формуле (3),

$$l_i = l_{in} + \Delta l_{ni} + \Delta l_{tci} + \Delta l_{tni} + \Delta l_{xi} + \Delta l_{ti} + \Delta l_{vi} \quad (4)$$

где  $l_{ik}$  – номинальная длина  $i$ -о стержня,  $\Delta l_m$  – осевая деформация стержня от действия пружин;  $\Delta l_{tg}$  – осевая деформация стержня от действия силы тяжести;  $\Delta l_{ti}$  – деформация стержня от прогиба под действием силы тяжести;  $\Delta l_{ki}$  – контактная деформация стержня в области его сферы;  $\Delta l_n$  – осевая деформация стержня от действия температуры;  $\Delta d$  – осевая деформация стержня от действия структурных превращений в металле, из которого изготовлены стержни.

В свою очередь на стержнях, расположенных правее  $i$ -о, стержня.

$$\Delta l_m = (j+1) K (b - b_0) l_i / (EF), \quad (5)$$

где  $j$  – количество пружин;  $K$  – коэффициент жесткости каждой из пружины;  $b$  – длина пружины после сжатия;  $b_0$  – длина пружины в свободном состоянии;  $E$  – модуль упругости Юнга материала стержней;  $F$  – площадь поперечного сечения стержня.

$$\Delta l_{tg} = \{ \sum m_i g \sin(\omega) \} l_i / (EF). \quad (6)$$

где  $\omega$  – угол между осью стержня и горизонтальной осью.

$$\Delta l_{tg} = \frac{8 f_i^2}{3 l_i}, \quad (7)$$

$$f_i = \frac{1}{2} \frac{mg \cos(\omega)}{EI} I^3 \left[ -\frac{1}{32} \left( \frac{l'}{l} \right)^2 + \frac{1}{16} \left( \frac{l'}{l} \right)^3 - \frac{1}{192} \left( \frac{l'}{l} \right)^4 \right],$$

где  $I$  – момент инерции сечения стержня  $I = (3,1415 d^4) / 4$ ,  
 $l'$  – расстояние между опорами  $i$ -о стержня.

$$\Delta l_n = 347,3 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2P^2}{R}}, \quad (8)$$

где  $P$  – сумма всех сил действующих в направлении оси нутромера.

$$\Delta l_{ti} = \alpha l_{0i} (t - t_0) \quad (9)$$

где  $l_{0i}$  – длина стержня при  $20^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура стержня в момент изменения;  $t_0$  – температура  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – коэффициент линейного удлинения материала стержня.

В работе описаны лабораторные исследования, проведенные диссертантом для выявления получаемой в результате термообработки структуры металла и ее влияния на стабильность длины стержней. Полученные данные изменения длины стержней для сталей У8, У12 позволяют учитывать этот фактор при определении размерных погрешностей нутромеров:

$$\Delta l_{ii} = k \tau l_i \tau^{1/3}, \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент, отражающий увеличение ( $k = 1$ ) или уменьшение ( $k = -1$ ) длины стержней во время старения.

*1. Торцы измерительных стержней – один сферический, другой плоский.* Для определения общего измерительного размера принята новая расчетная схема (рис. 4), в соответствии с которой получены зависимости для определения общего измерительного размера  $M_n N_n$  с стержнем

$$M_n N_n = \left\{ \left\{ (l_r - 2R) + \sum_{i=1}^n \left\{ [R\phi_i^2/2 - U_i \phi_i + (l_i - R) \cos \phi_i] \cos \phi_i^* - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - [U_i + (l_i - R) \sin \phi_i] \sin \phi_i^* \right\}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ [R\phi_i^2/2 - U_i \phi_i + (l_i - R) \cos \phi_i] \sin \phi_i^* - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - [U_i + (l_i - R) \sin \phi_i] \cos \phi_i^* \right\}^2 \right\}^{1/2} + 2R. \right. \right. \quad (11)$$

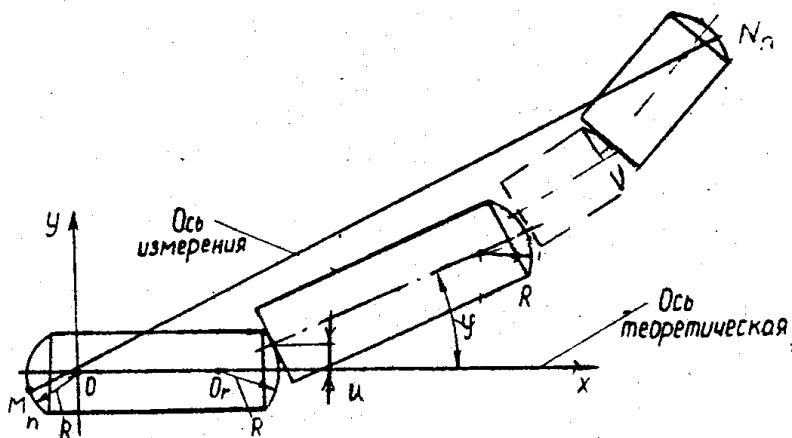


Рис. 4. Схема расположения в нутромере микрометрической головки и наконечника, имеющих сферический и плоский торцы

Формулы для расчета изменения длин стержней от действия силовых, тепловых и временных факторов полученные для случая обоих сферических торцов остаются справедливыми и здесь. Исключение составляет за-

висимость для расчета контактной деформации, которая в этом случае имеет вид

$$\Delta l_t = 347,3 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{P^2}{R}} \quad (12)$$

С учетом этих и других зависимостей расчет основной погрешности должен производиться по формуле

$$\Delta L = M_n N_n - (l_r + \sum_{i=1}^n l_m). \quad (13)$$

Такая формула с учетом зависимостей (1) – (12) представляет собой математическую модель основной погрешности микрометрического нутромера, которая устанавливает взаимосвязь между основной погрешностью нутромера и геометрическими, силовыми, температурными, временными факторами, действующими при изготовлении и эксплуатации нутромеров.

Предварительный анализ температурных деформаций стержней показал существенное влияние этого фактора на погрешность нутромера. Поскольку подвод тепла к стержням осуществляется по локальным площадкам, расположенным с одной стороны стержней, то очевидно, что их нагрев будет неравномерным. Исследования влияния неравномерности нагрева стержней на величины их деформаций также отражены во второй главе. Исследования проводились путем расчета с использованием метода конечных элементов. В результате установлено, что влияние неравномерности нагрева на искривления стержней и связанные с этим изменения общего измерительного размера малы и в практических расчетах этот фактор можно не учитывать.

В работе расчетом определена основная погрешность конкретной модели нутромера (НМ-1250). Результатом этого исследования является график, представленный на рис. 5. Эти данные были сопоставлены с результатами обмера партии нутромеров (20 шт), для которых установлен предельный разброс их погрешностей на разных диапазонах измерений и математические ожидания фактических значений этих погрешностей. Из полученных в работе графиков видно количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных, что говорит о достоверности созданной модели для прогноза точности общего измерительного размера нутромеров.

На основе математической модели получены графики влияния перечисленных выше факторов на погрешность микрометрических нутромеров. На их основе установлено, что доминирующими факторами являются: несоосности стержней; упругие и тепловые деформации, возникающие при их эксплуатации; структурные превращения металла, происходящие в стержнях со временем; отклонения формы, расположения и размеров сферических поверхностей торцов таких стержней. Кроме того, на основе модели выявлено, что нутромеры со стержнями, имеющими в стыке друг с другом сферические и плоские торцы, обеспечивают меньшую погрешность, чем стержни только со сферическими торцами.

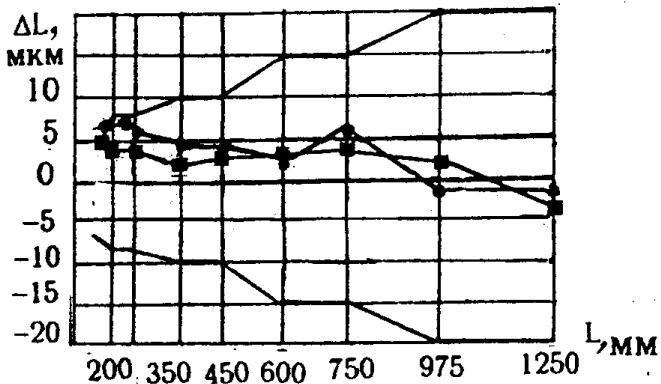


Рис.5. Расчетные и экспериментальные значения основной погрешности нутромера НМ-1250.

○ – расчетные значения;

□ – экспериментальные значения;

— – предельные значения допускаемой погрешности

В третьей главе диссертации в соответствии с ее второй задачей разработана методика проектирования микрометрических нутромеров, применяемых в промышленности. На основании методики создана программа ЭВМ. В соответствии с методикой проектирования основными исходными данными являются: длина стержней, диаметр стержней, радиус торца стержней, диаметр корпуса удлинителей, несоосность стержней (по чертежу); допуски перпендикулярности основных и вспомогательных баз корпусов (по чертежу); допуски линейных и диаметральных размеров стержней; длина пружины в свободном состоянии, длина пружины в сжатом состоянии, коэффициент жесткости пружин; температура при контроле погрешности измерительного размера нутромера; коэффициент линейного расширения материала стержней; коэффициент старения материала стержней; модуль упругости и плотность материала стержней.

Разработанная методика реализуется по следующей схеме (рис. 6).

В рассматриваемой главе диссертации представлена разработка новой конструкции нутромеров, связанная с изменением конструкции их удлинителей. В качестве критериев, определяющих целесообразность введения различных конструктивных изменений, были приняты три основных: точность функционирования, технологичность конструкции и силовой режим эксплуатации. Последний определяется жесткостью пружин, упругой деформацией стержней, контактными деформациями, жесткостью корпусов нутромера в сборке.

При рассмотрении точности функционирования, в соответствии с моделью погрешностей, используя формулу (3) для стержней с обоими сферическими торцами и формулу (12) для стержней с одним плоским и другим сферическим торцами, после подстановки их в формулу (13) установ-

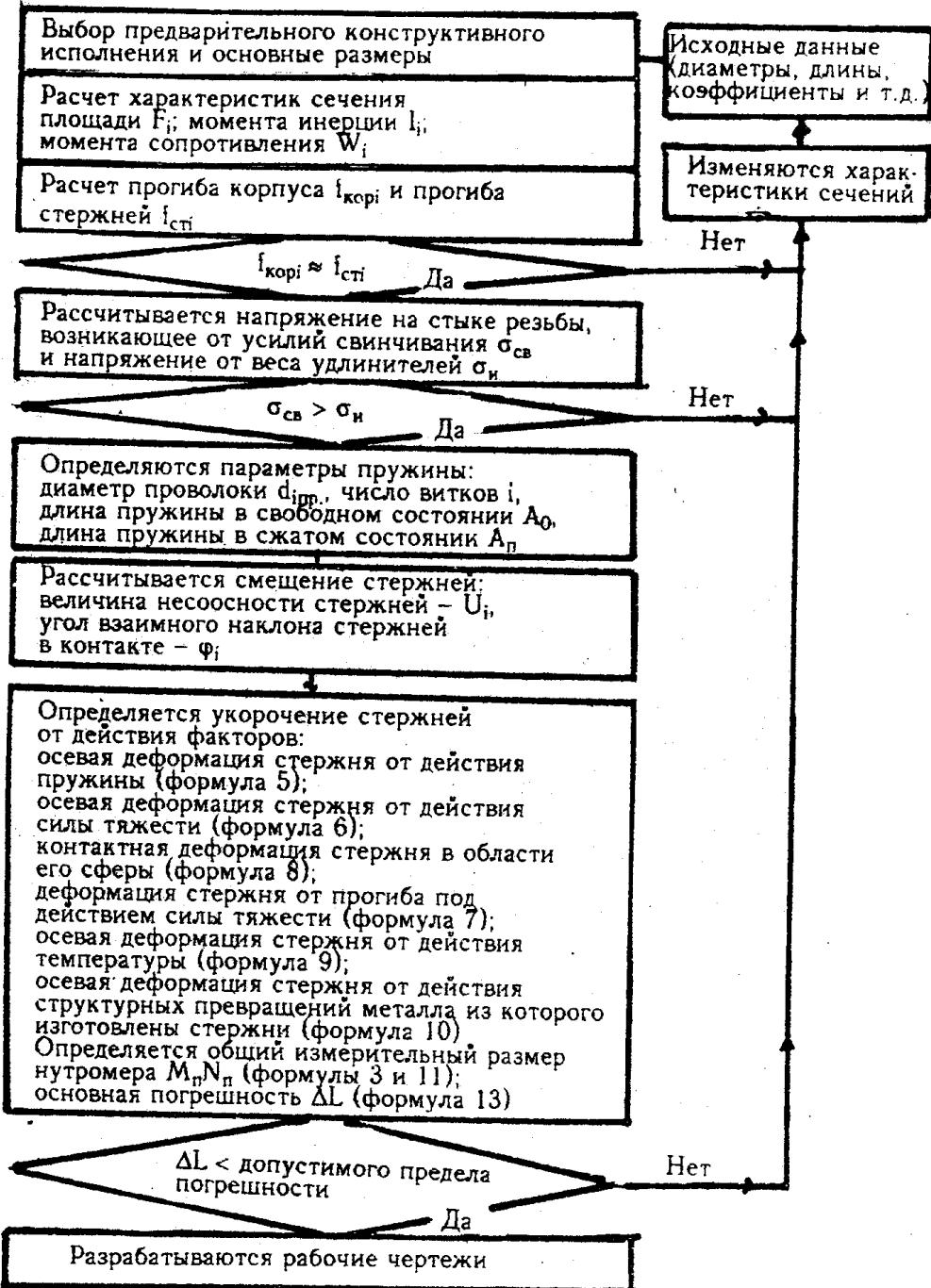


Рис.6. Методика расчета нутромеров

лена целесообразность применения стержней, имеющих один плоский а другой сферический торцы. Именно этот вариант был принят в качестве базового.

Кроме того, как показано во второй главе диссертации, численный анализ зависимостей (2) (10) показал существенное влияние на погрешность общего измерительного размера несоосности стержней (фактор  $U_i$ ). Базирование стержней в корпусе существующего удлинителя ведется по пояскам. Однако гарантированный зазор между этими поясками и стержнями, обеспечивающий их свободное перемещение, а также особенности схемы соединения корпусов (резьба, опорный торец) не позволяют обеспечить требуемую соосность стержней двух сопрягаемых удлинителей. Учитывая критерии технологичности изделия, ограничения силового режима, а также часто применяемой в практике расчетов принцип минимизации промежуточных размерных связей размерной цепи, было предложено применить трубчатую муфту. Муфта по посадке с натягом устанавливается на левые (рис. 7) концы стержней и по посадке с зазором на их правые концы. Это обеспечивает лучшую соосность стержней двух сопрягаемых удлинителей. По наружной поверхности муфта с относительно большим зазором базируется в поясках корпуса нутромера. Благодаря этой муфте достигается минимальное значение погрешностей  $U_i$  и  $\varphi_i$ , что обеспечивает высокую точность сборки. На нутромер получен патент Российской Федерации № 2011155.

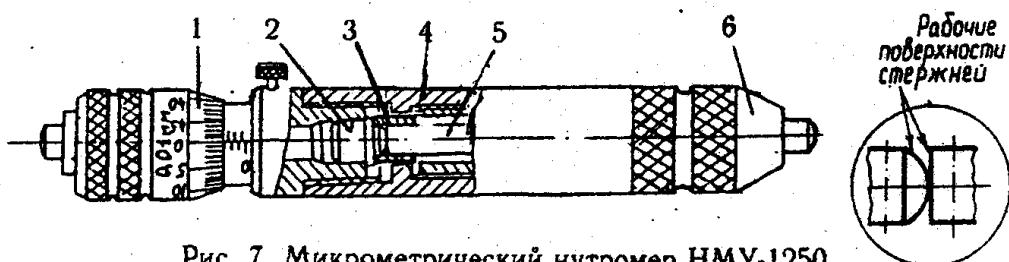


Рис. 7. Микрометрический нутромер НМУ-1250

- 1 – микрометрическая головка;
- 2 – контакт;
- 3 – муфта;
- 4 – удлинитель (корпус удлинителя);
- 5 – измерительный стержень;
- 6 – наконечник

Используя методику проектирования микрометрических нутромеров с плоскими торцами стержней, включающую зависимости для расчета их основной погрешности (глава III диссертации) был произведен расчет точностных характеристик нового нутромера. Расчеты показали, что его основная погрешность в среднем меньше чем этот же показатель у конструкции НМ-1250 (рис. 8). Этот же вывод подтвержден результатами измерений данных нутромеров на измерительной машине ИЗМ-3. В диссертации приведены результаты статистической обработки данных и полученные на их основе гистограммы. В заключении этой главы приведены срав-

нительные характеристики нутромёров НМ-1250 и НМУ-1250 по их частным параметрам. Сравнение показало преимущества НМУ-1250, к числу которых можно отнести отсутствие необходимости подбора удлинителей при комплектовании инструментов и полную взаимозаменяемость удлинителей комплектов разных нутромеров.

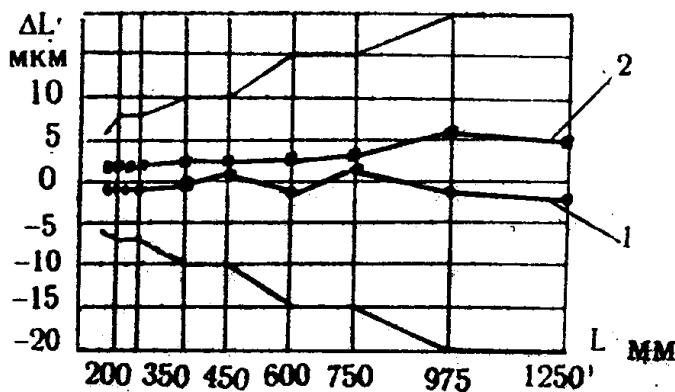


Рис. 8. Расчетные погрешности нутромеров НМУ-1250 (1) и НМ-1250 (2) на различных длинах комплектования

В четвертой главе диссертации на основе обзора литературных источников установлено, что обработка плоских торцев стержней нутромеров новой конструкции, имеющих высокие требования по перпендикулярности, невозможна на существующем отечественном оборудовании. Исходя из этого была решена четвертая задача диссертации, связанная с разработкой нового оборудования, которая включает в себя: определение факторов процесса доводки, технических требований для проектирования станка; выбор его конструктивной схемы; расчет траектории точек притира, определение кинематических характеристик процесса доводки и расчет точностных характеристик нового станка.

Точностной анализ показал, что существенным фактором, определяющим точность обработки, является погрешность формы поперечного сечения стержней нутромеров. С использованием кругломера модели Tayloron получены круглограммы таких сечений. Их анализ, проведенный с использованием разложения в ряд Фурье, показал, что доминирующими являются гармоники овальности, трехгранки и четырехгранки. Исходя из этого для определения допуска формы поперечного сечения стержней получены расчетные зависимости, включающие в себя величину угла призмы, где базируются стержни при их обработке, и допуска перпендикулярности их торцев.

С учетом указанных исследований был спроектирован и изготовлен новый доводочный станок, который внедрен в производство нутромеров новой конструкции (рис. 9, 10).

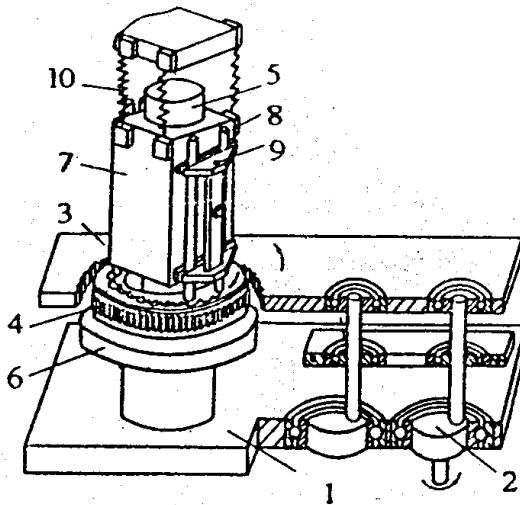


Рис. 9. Конструкция станка для доводки плоского торца стержней  
 1 – станина; 2 – эксцентриковый механизм;  
 3 – водило с внутренним зубчатым венцом;  
 4 – притир с наружным зубчатым венцом; 5 – шток;  
 6 – опорный диск; 7 – кассета; 8 – стержень; 9 – прижим;  
 10 – пружина

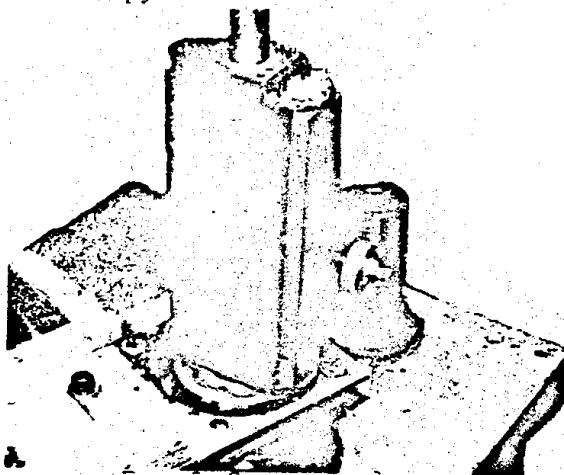


Рис. 10. Станок для доводки торцов

Достоинствами нового станка являются: возможность использования нескольких притиров для обработки одного комплекта стержней (это требуется по технологии доводки); возможность восстановления формы притира на плоскошлифовальном станке; обеспечение правки на шлифовальных станках штока, где базируется призма с закрепленными стержнями, и, опорного диска притира, что гарантирует высокую точность станка и обеспечивает допуск перпендикулярности торцов стержней  $0,01\text{мкм}$ .

**В пятой главе** диссертации отражены особенности внедрения результатов исследования в производство. Даны конкретные рекомендации связанные с внедрением новой конструкции нутромеров, оборудования и технологии получения плоских торцев. Приведены данные производственной проверки эффективности этих рекомендаций и разработанного оборудования.

## **Результаты работы**

1. Разработаны математическая модель, методика проектирования и программа для ЭВМ, позволяющие производить расчет погрешностей измерительного размера микрометрических инструментов с учетом геометрических, силовых, температурных и временных факторов.

2. На основе математической модели и методики проектирования создана и запатентована новая конструкция микрометрического нутромера, отличающаяся меньшими погрешностями измерительного размера, не требующая при сборке подбора удлинителей, обеспечивающая взаимозаменяемость удлинителей и не требующая строгого оговоренной последовательности соединения удлинителей при эксплуатации инструмента.

3. Разработан и изготовлен станок для доводки плоского торца стержней, обеспечивающий допуск его перпендикулярности 0,01 мкм.

4. Созданные методика расчета нутромеров, новая конструкция инструмента, спроектированное оборудование и разработанная технология обработки стержней внедрены на Челябинском инструментальном заводе.

## **Общие выводы**

1. Совершенствование точностных параметров микрометрических нутромеров достигается использованием математической модели, учитывающей совместное влияние геометрических, упругих и временных факторов, действующих в процессе изготовления и эксплуатации этих инструментов.

2. Доминирующими факторами, определяющими погрешность микрометрических нутромеров, являются: несоосности стержней в сборке; упругие и тепловые деформации, возникающие при их работе; структурные превращения металла, происходящие в стержнях с течением времени; отклонения формы, расположения и размеров сферических поверхностей торцев стержней.

3. Разработанная на основе созданной методики проектирования новая конструкция нутромера, снабженная стержнями различных по форме торцовыми поверхностями: плоской и сферической, имеет в 2-3 раза меньшую основную погрешность, чем традиционная конструкция нутромера со стержнями, торцы которых имеют только сферическую форму.

4. Установлено, что структурные превращения в металле, происходящие со временем в стержнях нутромеров, обуславливают 20–25% случаев преждевременного отказа по точности данных инструментов. Разработанная методика позволяет уменьшить количество отказов из-за структурных превращений в 2-3 раза.

5. Требуемое для новой конструкции нутромеров отклонение от перпендикулярности плоских торцов стержней их осям достигается на разработанном оборудовании, в котором базирующие поверхности закрепления инструмента и приспособления совмещены в одной детали станка.

### *Основные положения диссертации опубликованы в работах:*

1. Сафин В.Н. Влияние погрешностей расположения элементов микрометрического нутромера на его размер // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: Сб. науч. трудов. – Барнаул: АПИ, 1985. – С. 40–42.
2. Сафин В.Н. Сравнительный анализ погрешностей стержней нутромеров со сферическим и плоским торцем // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: Темат. сборник науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – С. 60–61.
3. Сафин В.Н. Влияние усилий, возникающих при измерении микрометрическим нутромером на погрешности размера // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. – Челябинск: ЧПИ, 1988. – С. 75–76.
4. Сафин В.Н., Нечаев В.М., Рожков П.Г. Джакели Л.А. Доводочный станок для получения плоского торца измерительных стержней нутромера // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. – С. 51–54.
5. Сафин В.Н. Технология получения плоского торца измерительных стержней нового нутромера. II Международная специализированная выставка. Машинострение // Прогрессивные технологии: Сб. тез. докладов – Челябинск, 1998. – с. 46.
6. Сафин В.Н., Лакирев С.Г. Влияние усилия пружины удлинителей микрометрического нутромера на его точность // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. – С. 40–42.
7. Патент Российской Федерации 2011155 от 15.04.94.  
– Лакирев С.Г., Сафин В.Н., Свиридов Ю.Н., Зайончик Л.Г.  
Бюл. №17.