

М 42/1338

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

Похмельных Вячеслав Михайлович

УДК 621.757

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОРИЕНТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ
ПО ОТКЛОНЕНИЯМ ОТ КРУГЛОСТИ ПРИ СБОРКЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Специальность 05.02.06 - Технология машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1984 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент СЕРЕНКО В.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор СЫРОВАТЧЕНКО П.В.

- кандидат технических наук,
с.н.с. ПУСТЫРЕВ В.Л.

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного совета

Защита состоится "19" ноября 1984 г. на заседании специализированного совета К 053 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва. Мл., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Ваш от _____ заверенный
печатью, пр _____

Автореф

Ученый
кандидат т

M 42 1338

II - 83

Подп. к п
Ротанпринт

жз.

5

Развитие современного машиностроения характеризуется неуклонным повышением требований к точности и надежности выпускаемых машин. Обеспечение этих условий возможно на основе создания высокоточного металлообрабатывающего оборудования, всемерного совершенствования технологических процессов изготовления и сборки изделий. Особое внимание уделяется развитию станкостроения, определяющего возможности производства в машиностроении. Так, на период до 1990 года необходимо повысить точность металлообрабатывающих станков не менее чем на 20-30%. Достижение высокой точности изготавливаемых станков требует больших материальных и трудовых затрат. Важное место в обеспечении качества станков занимает сборка, трудоемкость которой, например, при производстве высокоточных станков, достигает 55-60% от общей трудоемкости. Поэтому в решении поставленной задачи важная роль отводится развитию сборочных процессов с целью повышения точности и надежности сборочных единиц.

Актуальность темы. В настоящее время при сборке цилиндрических соединений с натягом, содержащих тонкостенную деталь, возникают трудности, связанные с обеспечением высокой точности формы рабочих поверхностей. Неподвижные посадки широко используются в конструкциях современных машин и станков при установке подшипников качения и скольжения, кондукторных втулок, направляющих элементов, стаканов, гильз и т.д. Отклонения формы рабочих поверхностей подобных соединений резко ухудшают такие показатели качества станков, как долговечность, точность обработки, вибрацию, износ и т.д. Поэтому они регламентируются в технических условиях величинами микрометрического уровня.

В результате сборки исходная точность формы рабочей поверхности тонкостенной детали теряется, и изделие подвергается разборке и повторной сборке или дополнительной обработке. Изменение поперечного профиля рабочей, ответственной поверхности детали во многом определяется сочетанием отклонений от круглости посадочных поверхностей сопрягаемых деталей в момент сборки. На этом принципе основаны методы управления точностью формы ответственной поверхности соединений при сборке на основе ориентации деталей, позволяющие до 2 раз уменьшать исходную величину отклонения от круглости. Однако рекомендации по их использованию носят противоречивый характер, существует неопределенность в оценке их эффективности, отсутствуют научно обоснованные критерии выбора параметров ориен-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1421338

Похмельных В.М. Исследования



тации, невысока точность прогноза отклонения от круглости ответственной поверхности соединения.

Вышесказанное, а также использование при сборке высокоточных соединений ручного высококвалифицированного труда определяет актуальность решения проблемы обеспечения точности изделий при снижении трудоемкости сборки и необходимости проведения дополнительных исследований.

Цель работы – исследование и разработка методов управления точностью формы ответственной поверхности изделий при сборке на основе изучения технологической наследственности отклонений формы.

Методы исследований. Для исследования точностных параметров высокоточных цилиндрических соединений при их сборке с натягом использовались расчетно-аналитические и экспериментальные методы. Прогнозирование точности формы ответственной поверхности подобных соединений и определение на этой базе параметров управления процессом сборки получено с помощью теории тригонометрических рядов Фурье, алгебры, теории обыкновенных дифференциальных уравнений, теории упругости и неразрывно связано с основными положениями теории технологической наследственности. Обработка результатов теоретических и экспериментальных исследований выполнялась на ЭВМ. Экспериментальные исследования проведены с использованием современной контрольно-регистрирующей аппаратуры на разработанных экспериментальных стендах и установках. Объектами экспериментов являлись образцы и промышленные изделия. Изучалась сборка цилиндрических соединений с натягом типа корпус (вал) – тонкостенная деталь.

Научная новизна. 1). Выявлены особенности технологического наследования отклонений от круглости поверхностей деталей при их сборке с натягом. 2). Получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов наследования при сборке высокоточных цилиндрических соединений с натягом, позволяющие прогнозировать точность формы их ответственной поверхности. Теоретические модели технологического наследования отклонений от круглости поверхностей сопрягаемых деталей позволяют установить количественную взаимосвязь между отклонением формы ответственной поверхности типовых цилиндрических соединений и исходными отклонениями формы поверхностей, упругими характеристиками материала и геометрических параметров деталей. 3). Установлены особенности использо-

вания методов ориентации деталей по отклонению от круглости при сборке и разработан метод ориентации, позволяющий повысить точность сборки реальных высокоточных соединений. 4). Определены требования и условия проведения технологического процесса автоматизированной сборки указанных соединений с ориентацией. Предложена принципиальная схема участка для сборки соединений с ориентацией.

Практическая ценность. Практическую ценность работы представляют:

1. Научно обоснованная методика расчета отклонений от круглости ответственной поверхности высокоточных цилиндрических соединений с натягом.

2. Метод ориентации деталей, позволяющий оптимизировать процесс сборки по отклонениям от круглости их поверхностей.

3. Рекомендации по применению методов ориентации деталей при сборке, позволяющие оценить эффективность их использования.

4. Оригинальное устройство для сборки высокоточных цилиндрических соединений с ориентацией по отклонениям от круглости.

Реализация работы. Результаты работы в виде алгоритмов и программ для расчета отклонения от круглости ответственной поверхности рассматриваемых соединений при сборке, методики ориентации деталей при сопряжении и определения ее параметров, а также рабочие чертежи сборочного устройства переданы НПО "Оргстанкинпром".

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: республиканском совещании "Механизация и автоматизация ручных и трудоемких работ в машиностроении", Ижевск, 1981 г.; республиканской научно-технической конференции "Состояние и перспективы применения вычислительной техники в машиностроительной промышленности Узбекистана", Ташкент, 1982 г.; всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания гибких производственных систем при внедрении "безлюдной" технологии в промышленности", Днепропетровск, 1983 г.; всесоюзном научно-техническом совещании "Механизация и автоматизация сборки изделий машиностроения для агропромышленного комплекса" - "Сборка-83", Кишинев, 1983 г.; республиканской научно-технической конференции "Повышение эффективности производства механизацией и автоматизацией механосборочных и вспомогательных процессов в машиностроении с применением промышленных роботов и манипуляторов", Ташкент, 1983 г.; семинаре "Теоретические проблемы стандартизации гибких автоматизированных производств", Москва, 1984 г.;

научном семинаре кафедры АМ-ИЗ МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1984 г.

Публикации. Материал диссертации отражен в 7 публикациях. Получено 2 положительных решения на изобретения.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и общих выводов, изложенных на 144 страницах машинописного текста. Работа содержит 92 рисунка, 28 таблиц, приложения на 24 страницах и список литературы из 69 наименований.

В первой главе содержится обзор и анализ состояния проблемы обеспечения качества высокоточных цилиндрических соединений с натягом на этапе сборки по опубликованным в научной литературе материалам и производственным данным. Этой проблеме посвящены труды многих советских ученых, в том числе, А.М.Дальского, В.С.Корсакова, П.В.Сыроватченко, М.П.Новикова, В.В.Косилова, А.М.Фигатнера, А.А.Гусева и других.

Рассмотрены конструктивные и технологические особенности высокоточных цилиндрических соединений с натягом, области их применения, основные точностные требования, предъявляемые к ним. Проанализированы основные виды отклонений от круглости, присущие различным видам чистовой и отделочной обработке заготовок. Установлено, что в большинстве случаев для высокоточных деталей характерен сложный состав спектра отклонений от круглости.

Выявлено влияние отклонений от круглости рабочей, ответственной поверхности соединения на эксплуатационные параметры изделия: долговечность, шум и вибрацию, момент трения, износ, точность вращения осей и шпинделей, точность обработки деталей на станках.

На основе анализа литературных и производственных данных составлена структурная схема формирования отклонений формы поверхностей высокоточных цилиндрических соединений с натягом в процессе сборки. Управление отклонением от круглости ответственной поверхности соединения возможно на основе учета исходных точностных параметров деталей. В процессе сборки реализация этого положения осуществляется за счет поворота деталей вокруг их продольных осей, т.е. радиальной параметрической ориентации (РПО).

Проанализированы и вскрыты особенности известных методов РПО: по максимальным биениям, по сдвигу начальных фаз доминирующих гармоник, по разностенности. Изучены методы и специфика теоретических расчетов напряженно-деформированного состояния деталей прессовых соединений. Установлено, что существующие методы

РПО имеют ряд недостатков, сужающих области их применения, снижающих их эффективность, они не позволяют прогнозировать точность формы соединения, известные методы расчета поперечного профиля ответственной поверхности соединения сложны, противоречивы, нет рекомендаций по их применению.

В соответствии с результатами анализа и целью исследований необходимо было решить следующие основные задачи: 1) разработать теоретическую модель технологического наследования отклонений от круглости при сборке реальных типовых высокоточных соединений с натягом для двух гипотез о наличии или отсутствии касательных напряжений в зоне контакта деталей соединения; 2) разработать метод управления отклонением от круглости ответственной поверхности соединения на этапе сборки; 3) экспериментально проверить результаты теоретических исследований и получить данные для определения влияния конструктивных и технологических факторов на технологическую наследственность при сборке деталей; 4) экспериментально оценить эффективность различных методов РПО и выявить области их применения, определить особенности их использования при сборке высокоточных деталей; 5) выявить технологические требования к оборудованию автоматизированного участка сборки высокоточных соединений с ориентацией по отклонениям формы и разработать устройства для ее выполнения.

Во второй главе проведено теоретическое исследование механизма формирования отклонений формы ответственной поверхности при сборке высокоточных цилиндрических соединений с натягом.

Разработка теоретической модели технологического наследования отклонений от круглости при сборке базировались на основных положениях плоской задачи теории упругости. Отклонения поперечного профиля поверхностей деталей и соединений описывались с помощью тригонометрических рядов Фурье. Искажение исходного профиля в поперечном сечении ответственной поверхности тонкостенной детали при ее запрессовке в корпус (вал) возникает из-за неравномерных радиальных деформаций тонкостенной детали, вызванных контактными усилиями на посадочных поверхностях собираемых деталей. Переменный характер контактного давления в этом случае объясняется непостоянством величины радиального натяга из-за наличия отклонений от круглости посадочных поверхностей деталей. Решение плоской задачи теории упругости ведется с помощью функции напряжений Эри Φ , имеющей вид:

$$\Phi = a_0 \ln r + b_0 r^2 + \sum_{i=2}^{\infty} (A_i r^i + B_i r^{i+2} + C_i r^{-i} + D_i r^{-i+2}) \cos(i\varphi + \varphi_i), \quad (1)$$

где a_0, b_0 — коэффициенты, характеризующие решение задачи для постоянной по периметру части натяга; A_i, B_i, C_i, D_i — произвольные постоянные коэффициенты, характеризующие решение задачи для переменной по периметру части натяга; i, φ_i — номер и начальная фаза гармоники, описывающей неровности профиля поперечного сечения посадочной поверхности одной из деталей; r — текущий радиус-вектор точки тела; φ — текущий полярный угол.

Используя зависимости компонент напряженного состояния, выраженные через функцию Эри Φ , и граничные условия, характеризующие состояние соединения, для каждой гармоники получена система линейных алгебраических уравнений 8-го порядка. Данная задача была решена для двух случаев граничных условий, характеризующих отсутствие или наличие касательных напряжений на поверхностях контакта.

Аналитическое решение задачи при допущении гипотезы об отсутствии касательных напряжений для случая запрессовки тонкостенной детали, например, кольца, в корпус позволило получить следующее выражение для радиальных перемещений $u_{r\text{пс}i}$ точек ответственной поверхности соединения от переменной части натяга:

$$u_{r\text{пс}i} = -\frac{4iP S_{0i}}{E' W_1} [b(\alpha^{3i+1} - \alpha^a) - a(\alpha^{3i-1} - \alpha^b)] \cos(i\varphi + \varphi_i), \quad (2)$$

где S_{0i} — амплитуда i -ой гармоники посадочной поверхности;

$$W_1 = q_f' P U_1 - q_f'' N (r_1/r_2)^{2\beta} M_1; \quad P = i(1-\beta^{-2})^{-2} - \beta^{-2\beta}(1-\beta^{2i})^2;$$

$$N = i(1-\alpha^{-2})^{-2} - \alpha^{-2\beta}(1-\alpha^{2i})^2;$$

$$U_1 = 2i^2 \alpha^{2\beta} - i\beta - an'' + ab(m' + n') \alpha^{2i} + (bm' - ia) \alpha^{4i} - i(bm' + an') \alpha^{2a};$$

$$M_1 = 2i^2 \beta^{2\beta} - i\beta - an'' + ab(m'' + n'') \beta^{2i} + (bm'' - ia) \beta^{4i} - i(bm'' + an'') \beta^{2a};$$

$$\alpha = r_1/r_0; \quad \beta = r_2/r_0; \quad q_f' = (1+\nu')/E'; \quad q_f'' = (1+\nu'')/E'';$$

$$a = i-1; \quad b = i+1; \quad n' = -i+2-4\nu'/(1+\nu'); \quad n'' = -i+2-4\nu''/(1+\nu'');$$

$$m' = i+2-4\nu'/(1+\nu'); \quad m'' = i+2-4\nu''/(1+\nu'');$$

$$m'' = i+2-4\nu''/(1+\nu'');$$

Γ_0 – радиус посадочной поверхности; Γ_1 – радиус отверстия кольца; Γ_2 – радиус наружной поверхности корпуса; E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала деталей соответственно (здесь и далее символы с одним штрихом относятся к охватываемой детали, с двумя штрихами – к охватывающей).

Оценка степени наследования ответственной поверхности соединения исходных отклонений формы поверхностей деталей производилась с помощью коэффициентов наследования K_i :

$$K_i = S_{1сбi} / S_{0i}, \quad (3)$$

где $S_{1сбi}$ – амплитуда i -ой гармоники ответственной поверхности соединения.

Анализ зависимостей (2) и (3) показывает, что перемещения $U'_{1сбi}$ и соответствующий коэффициент наследования K_i зависят от размеров, конструктивных и точностных параметров деталей, а также от материала обеих деталей. Для рассмотренного случая сборки с увеличением номера гармоники i коэффициент K_i уменьшается.

Оценка габаритных размеров деталей соединения производилась с помощью безразмерного коэффициента толстостенности ξ :

$$\xi = r_{вн} / r_n, \quad (4)$$

где $r_{вн}$ и r_n – внутренний и наружный радиусы детали соответственно. Аналитические исследования показали, что коэффициент толстостенности кольца ξ' при фиксированном значении коэффициента толстостенности корпуса ξ'' при своем увеличении приводит к увеличению K_i . Следует отметить, что с увеличением номера гармоники степень влияния коэффициента ξ' на K_i также увеличивается.

Это означает, что увеличение толщины кольца приводит тем к более эффективному "гашению" гармонической составляющей, чем больше ее номер. Проведено также исследование влияния материалов деталей на поведение коэффициента наследования K_i . Это позволяет повысить точность прогноза величины отклонения от круглости ответственной поверхности соединения.

Проведено решение задачи о перемещениях точек наружной поверхности тонкостенной детали, напрессованной на вал. В работе приведены аналитические зависимости для определения указанных перемещений и коэффициентов K_i ; они различны для случаев сборки тонкостенной детали со сплошным и полым валами.

При сравнении с соединением корпус–кольцо при прочих равных

условиях величина K_i для соединения вал-кольцо мала. Причиной этого является различный характер напряженного состояния кольца для указанных двух случаев.

Проведено решение указанных задач при принятии гипотезы о наличии касательных напряжений в зоне контакта. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять форму поперечного профиля ответственной поверхности типовых цилиндрических соединений при их сборке с натягом. Для сборки, например, кольца, с корпусом расчеты показали, что коэффициент наследования для гармоник $i = 2; 3$ и в ряде случаев для гармоник $i = 4; 5$ имеет значения больше единицы. Кроме того, для гармоник $i = 2; 3$ при увеличении коэффициента толстостенности кольца ξ' при прочих равных условиях коэффициент K_i сначала возрастает, а затем уменьшается. Анализ теоретических исследований показал значительное различие в результатах прогноза точности формы ответственной поверхности соединений для расчетов по гипотезам об отсутствии или наличии касательных напряжений в зоне контакта ($\tau_{r\varphi 0} = 0$; $\tau_{r\varphi 0} \neq 0$).

Полученные аналитические зависимости были положены в основу моделей технологического наследования отклонений от круглости при сборке типовых цилиндрических соединений с натягом. Теоретические исследования этих моделей проводились на базе разработанных программ для вычислительного комплекса "ИСКРА-1256". Аналитическое решение поставленных задач позволило упростить расчетные программы, повысить точность счета по сравнению с численными методами.

На основе данных теоретических исследований в работе предложен полигармонический метод РПО при сборке деталей. Он основан на учете исходных отклонений от круглости посадочных и ответственной поверхностей собираемых деталей. Оптимальный с точки зрения точности угол ориентации деталей при сборке определяется путем прогнозирования отклонения от круглости ответственной поверхности соединения. Разработана программа для расчета оптимального угла ориентации θ_{opt} . Рассмотрены методы расчета θ_{opt} по полигармоническому и известным методам РПО для различных случаев сочетания отклонений от круглости поверхностей деталей.

Эффективность использования при сборке метода РПО предложено оценивать с помощью коэффициентов эффективности и искажения. Например, для соединений корпус-тонкостенная деталь, за коэффициент эффективности ориентации $\mathcal{E}_0$ принято отношение минимально возможного отклонения от круглости ответственной поверхности соеди-

нения $\delta_{1сб\min}$ к максимально возможному отклонению от круглости $\delta_{1сб\max}$ для данной пары деталей. Проведен анализ поведения коэффициента $\bar{\theta}_0$ для отдельно взятой гармоники. Установлено, что полное или значительное уменьшение амплитуды i -ой гармоники соединения следует ожидать при условии

$$K_i S_{0i}' - S_{1i} \cos(\varphi_{0i}' - \varphi_{1i}) = K_i S_{0i}'' , \quad (5)$$

где S_{1i} , φ_{1i} — соответственно амплитуда и начальная фаза i -ой гармоники ответственной поверхности тонкостенной детали. Коэффициент искажения K_{ii} отклонения от круглости ответственной поверхности тонкостенной детали δ_i определяется в зависимости от исходных отклонений от круглости посадочных поверхностей корпуса δ_0'' и тонкостенной детали δ_0' :

$$K_{ii} = \delta_{1сб} / (\delta_0'' + \delta_0' + \delta_i) , \quad (6)$$

а для i -ой гармоники

$$K_{ii} = S_{1сб i} / [S_{0i}'' + S_{0i}' + S_{1i} \cos(\varphi_{0i}' - \varphi_{1i})] . \quad (7)$$

Коэффициенты K_{ii} и K_{ii} позволяют оценить результаты, достигаемые за счет ориентированной сборки. Указанные показатели необходимо использовать на практике для выбора наилучшего для данных конкретных условий метода РПО и оценки его эффективности.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований сборки высокоточных цилиндрических соединений с натягом с применением методов РПО.

Исследования сборки соединений типа тонкостенная деталь-корпус проводилась на натурных образцах. В качестве образцов использовались наружные кольца подшипников серий 205 ($d_0 = 52$ мм, где d_0 — посадочный диаметр), 3182107 ($d_0 = 62$ мм) и 3182110 ($d_0 = 100$ мм), размеры которых широко распространены в машиностроении, и соответствующие толстостенные диски, имитирующие корпуса. В качестве материала корпусов была выбрана сталь 20, материал колец — ШХ15. Исследования сборки соединений тонкостенная деталь-вал проводились на моделях, при этом специальное нагрузочное устройство имитировало деталь типа вала, а в качестве тонкостенной детали служили специально изготовленные кольца с $d_0 = 75$ мм (сталь 45, закаленная). Принцип действия нагрузочного устройства заключался в регламентированном изменении на-

ружного диаметра рабочей поверхности его оправки за счет давления гидронапастмассы. Данные тарировки нагрузочного устройства позволили создавать в соединениях натяги до 30 мкм.

Все экспериментальные образцы тщательно аттестовывались по основным точностным параметрам. Отклонения формы посадочных поверхностей колец ($d_0 = 52; 62; 100$ мм) находились в пределах 0-0,65 мкм, колец ($d_0 = 75$ мм) - 1,45-8,12 мкм, корпусов - 0,23-2,25 мкм, оправок - 1,2-5,5 мкм, ответственных поверхностей колец ($d_0 = 52; 62; 100$ мм) - 0,06-2,48 мкм, колец ($d_0 = 75$ мм) - 1,23-6,38 мкм. Измерения профилей в поперечном сечении образцов велись на кругломере "Talysond-50" и разработанном стенде. С целью детального изучения технологической наследственности при сборке рассмотренных соединений по круглограммам поверхностей деталей определялся амплитудно-частотный спектр неровностей профиля, описываемых с помощью тригонометрических рядов Фурье. Измерение круглограмм проводилось по разработанной методике.

Образцы для сборки соединений корпус-кольцо проходили селективный подбор с целью получения натягов, не превышающих 30 мкм. Сборка велась тепловым методом путем охлаждения колец в твердом углекислом газе и жидком азоте.

В работе приведена методика экспериментальных исследований, которая предусматривает проведение сборки деталей с различными углами ориентации, сравнение результатов прогнозирования точности формы ответственной поверхности соединений с фактическими данными, а также сравнение результатов сборки для различных методов РПО. Для исследований были выбраны следующие методы ориентации: 1) по максимальным биениям; 2) по сдвигу начальных фаз доминирующих гармоник; 3) по разностенности; 4) по разработанному полигармоническому методу.

Установлено, что разработанные теоретические модели технологического наследования отклонений от круглости при учете касательных напряжений в зоне контакта имеют большую адекватность практическим условиям, чем в случае, когда они не учитываются. Экспериментально доказано, что коэффициенты наследования K_i для малых номеров гармоник могут быть больше 1, а для гармоник с $i = 4-6$ и более величины K_i , определенные по гипотезе $\tau_{r\varphi_0} \neq 0$ принимают значения меньшие, чем по гипотезе $\tau_{r\varphi_0} = 0$. В работе приводится объяснение этим моментам на основе рассмотрения характеристик напряженно-деформированного состояния за-

прессованного кольца. Вышесказанное справедливо для сборки большинства реальных деталей. В то же время установлено, что если отклонения от круглости посадочных поверхностей деталей не превышают 0,2–0,3 мкм, то для прогнозирования точности сборки можно использовать результаты теоретических исследований при условии $\epsilon_{г\phi_0} = 0$. Было установлено, что эксцентриситет ϵ наружной и внутренней поверхностей колец, находящийся в пределах 0–5,3 мкм, не оказывал влияния на полученные результаты.

В работе приведены результаты сравнения эффективности исследуемых методов РПО. Установлено, что за счет использования при сборке ориентации возможно уменьшение амплитуд гармоник ответственной поверхности в 2–10 раз по отношению к исходному значению. Причем наилучшие результаты соответствуют случаю, когда величины амплитуд одноименных гармоник рассматриваемых поверхностей корпуса (вала) и кольца имеют один порядок, что подтверждает соответствующие теоретические положения. Если неровности поверхностей деталей имеют сложный, полигармонический спектр, то может быть достигнуто 2–3 кратное уменьшение отклонений формы ответственной поверхности соединения при сборке с оптимальным углом ориентации $\theta_{опт}$. В этом случае угол $\theta_{опт}$ соответствует компромиссному сочетанию гармонических составляющих при сборке, когда наиболее значимые из них "гасятся", а другие изменяются незначительно и даже могут несколько увеличиться (гармоники с малыми амплитудами).

Экспериментально доказана различная эффективность использования при сборке исследуемых методов РПО. Установлено, что при сборке высокоточных соединений они могут приводить к значительным ошибкам в определении угла $\theta_{опт}$, что отрицательно сказывается на их точности формы. Причинами этого для метода ориентации по максимальным биениям являются отсутствие учета отклонения формы ответственной поверхности кольца, неоднозначность определения места максимального биения поверхности детали по круглограмму при некотором эксцентриситете ее записи. Недостатками метода ориентации по углу сдвига начальных фаз доминирующих гармоник является односторонность решения задачи оптимизации формы ответственной поверхности соединения, поскольку расчет ведется только по одной гармонике, отсутствие учета коэффициента наследования K_i и того факта, что профиль посадочной поверхности кольца наследуется ответственной поверхностью соединения с противофазой. Метод ориен-

тации по разностенности приводит к отрицательным результатам в случаях, когда доминирующие одноименные гармоники наружной и внутренней поверхностей кольца имеют разность начальных фаз, равную полупериоду этой гармоники или кратную этой величине. Этот метод можно использовать при больших эксцентриситетах тонкостенной детали (более 12-20 мкм).

Разработанный метод ориентации был апробирован при сборке таких шпиндельных узлов, как отделочно-расточные головки. Изучалось влияние сборки с ориентацией головок AP-2B на их точностные характеристики и вибрацию.

Методика эксперимента, приведенная в работе, предусматривает аттестацию деталей шпиндельных узлов. Сравнению подвергались головки, собранные с применением ориентации и без нее. Измерение точностных параметров головок велось индуктивными датчиками с ценой деления 0,1 мкм, а виброскорости точек корпуса, расположенных у подшипниковых опор, - виброизмерительной аппаратурой фирмы "RFT".

Установлено, что ориентация деталей при сборке соединений шпиндельных узлов влияет на их точностные параметры и вибрацию. Так, радиальное биение шпинделя головки, собранной при использовании оптимальных углов РПО, более чем в 2 раза меньше, чем у головки, сборка задней опоры которой велась с наилучшими с точки зрения точности углами ориентации. Торцовое биение при этом изменилось незначительно. Сборка отделочно-расточной головки с проведением РПО позволила снизить уровень вибрации корпуса на 4...5 дБ.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки автоматизированного участка сборки с ориентацией высокоточных цилиндрических соединений с натягом. Основой для разработки участка явились результаты анализа проведенных теоретических и экспериментальных исследований. При этом учитывались особенности сборки высокоточных соединений с натягом.

Разработана структура участка, включающая измерительный, вычислительный и сборочный секторы. Сформулированы назначение и основные требования к ним, а также рассмотрено необходимое оснащение. Предложен технологический маршрут сборки на данном участке. Сборка соединений с натягом осуществляется тепловым методом путем охлаждения охватываемой детали. Рассмотрены операции, выполняемые промышленным роботом, которым оснащается сборочный

сектор. Для выполнения сборки высокоточных деталей с ориентацией предложено оригинальное сборочное устройство. Сборка осуществляется в вертикальном направлении. При сборке деталей производится их взаимная и радиальная параметрическая ориентация. Взаимная ориентация обеспечивает совмещение центров деталей и параллельность их продольных осей. РПО обеспечивает оптимальное сочетание отклонений от круглости поверхностей деталей.

Проведена проверка функционирования опытного образца рассмотренного сборочного участка. Оценены технологические возможности разработанного сборочного устройства. Установлено, что допустимая скорость сборки зависит от величины смещения собираемых деталей, размера их фасок, гарантированного сборочного зазора. Как показали эксперименты, сборочное устройство позволяет производить сборку деталей даже при смещениях их центров, величина которых в 1,3–2,1 раза больше, чем сумма катетов фасок деталей, измеренных в торцовой плоскости. При этом смещения деталей достигали 1–2,3 мм. Устройство позволяет собирать соединения с малыми гарантированными сборочными зазорами – до 0,010 мм для деталей типа колец. Рекомендуется выполнять сборку соединений со скоростью 10–20 мм/с.

В пятой главе приведены рекомендации по применению методов ориентации по отклонению от круглости при сборке высокоточных цилиндрических соединений с натягом. Рассмотрены сравнительная характеристика методов РПО и необходимое для их реализации оснащение. Приведена последовательность и содержание операций сборки с ориентацией.

Проведен расчет технико-экономического эффекта от внедрения методики сборки с ориентацией по отклонению от круглости.

В приложениях к работе приведены программы по расчету коэффициентов наследования при сборке различных видов цилиндрических соединений, определению параметров амплитудно-фазового спектра поверхностей деталей, расчету оптимального угла ориентации при сборке.

ВЫВОДЫ

I. Управление точностью формы ответственной поверхности на этапе сборки высокоточных цилиндрических соединений с натягом возможно за счет применения радиальной параметрической ориентации деталей. Установлено, что при сборке реальных деталей с РПО

для получения соответствующего эффекта необходимо учитывать первоначальные отклонения от круглости всех их поверхностей.

2. В процессе сборки соединения с натягом происходит неравномерная радиальная деформация тонкостенной детали, которая в случае наличия натяга в соединении больше, чем суммарная величина отклонения от круглости посадочных поверхностей деталей, зависит от исходных отклонений от круглости этих поверхностей, ориентации деталей при сборке, их размеров и конструктивного вида, а также материалов, из которых они изготовлены.

3. Сборку высокоточных соединений с натягом целесообразно проводить с применением разработанного полигармонического метода РПО. Он обеспечивает уменьшение отклонения от круглости ответственной поверхности соединения в 2-3 раза. Проведение сборки отделочно-расточных головок с ориентацией по полигармоническому методу позволило уменьшить в 2 раза радиальное биение шпинделя и на 10-15 % снизить уровень вибрации.

4. Эффективность сборки с применением РПО зависит от соотношения параметров амплитудно-фазового спектра отклонений формы поперечного профиля посадочных и ответственной поверхностей собираемых деталей. Метод РПО эффективно влияет на точность формы ответственной поверхности соединения при соотношении амплитуд одноименных гармоник посадочных поверхностей в пределах 0,3-5,5.

5. Для сборки высокоточных соединений метод РПО по максимальным биениям применять не рекомендуется. Метод сдвига начальных фаз доминирующих гармоник может быть использован только в частных случаях, характеризуемых наличием ярко выраженной гармоникой одного номера на поверхностях собираемых деталей и условии, что отклонение от круглости посадочной поверхности тонкостенной детали мало по сравнению с точностью других поверхностей. Ориентация деталей по разностенности, оказывающей влияние на точность изделия, целесообразна при эксцентриситете тонкостенной детали более 12...15 мкм.

6. Прогнозирование формы поперечного профиля ответственной поверхности высокоточных цилиндрических соединений с натягом целесообразно проводить на основе разработанных теоретических моделей технологического наследования отклонений от круглости. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при сборке большинства реальных соединений корпус-кольцо коэффициент насле-

дования гармоник с малым номером ($i = 2, 3, 4, 5$) может быть больше единицы, а при сборке соединений вал-кольцо коэффициент на следования всегда остается меньше единицы.

7. Расчет оптимального угла ориентации по полигармоническому методу и прогнозирование точности сборки рекомендуется осуществлять с учетом наличия касательных напряжений на поверхностях контакта. При отклонении от круглости посадочных поверхностей деталей менее $0,2-0,3$ мкм этот расчет можно проводить без учета касательных напряжений.

8. Сборку высокоточных цилиндрических соединений с натягом с ориентацией по полигармоническому методу РПО целесообразно проводить в условиях разработанного автоматизированного сборочного комплекса с использованием современных средств контрольно-измерительной и вычислительной техники.

9. Разработанное оригинальное сборочное устройство позволяет надежно собирать соединения с гарантированным сборочным зазором до 10 мкм при начальном несовпадении центров деталей $1,5-2$ мм.

10. В результате проведенных исследований разработаны рекомендации по использованию различных методов РПО при сборке высокоточных соединений с натягом в станкостроении. Внедрение разработанных рекомендаций дало экономический эффект 1170 руб. на одном станкостроительном заводе.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Серенко В.А., Похмельных В.М., Бабаскин А.Г. Автоматизация сборки высокоточных цилиндрических соединений. - Механизация и автоматизация ручных и трудоёмких работ в машиностроении: Тезисы докладов республиканского совещания. - Ижевск, 1981, с.29-30.

2. Методы сборки, контроля и испытания шпиндельных узлов станков высокой и особо высокой точности: Технологический регламент РТМ2-С10-153-81/ А.М.Дальский, В.А.Серенко, В.М.Похмельных и др., НИИМаш, 1982. - 28 с.

3. Похмельных В.М. Использование промышленного робота первого поколения при сборке цилиндрических соединений. - Состояние и перспективы применения вычислительной техники в машиностроительной промышленности Узбекистана: Тезисы докладов республикан-

ской научно-технической конференции. - Ташкент, 1982, с. 92.

4. Серенко В.А., Похмельных В.М. Автоматизация рабочего места сборщика для обеспечения "безлюдной" технологии. - Проблемы создания гибких производственных систем при внедрении "безлюдной" технологии в промышленности : Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1983, с. 48-49.

5. Серенко В.А., Бабаскин А.Г., Похмельных В.М. Устройство для сборки цилиндрических соединений с малыми зазорами. - Повышение эффективности производства механизацией и автоматизацией механосборочных и вспомогательных процессов в машиностроении: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1983, с. 51-53.

6. Похмельных В.М. Технологические возможности автомата для сборки цилиндрических соединений. - Повышение эффективности производства механизацией и автоматизацией механосборочных и вспомогательных процессов в машиностроении: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. - Ташкент, 1983, с. 53-54.

7. Похмельных В.М., Серенко В.А., Шитиков В.Н. Исследования способов управления точностью цилиндрических соединений при сборке. - Труды/ МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1983 (обложка 1984 г.), № 405, Прогрессивная технология конструкционных материалов, с. 96-103.

Бисер

