

М249472
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Владимир Александрович СЕРЕНКО

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
СБОРКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С НАТЯГОМ

(Специальность 05.02.08 — Технология машиностроения)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

доктор технических наук, профессор Дальский А. М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Новиков М. П.,

кандидат технических наук, доцент Строганов Г. А.

Ведущее предприятие —

Станкостроительный завод «Красный пролетарий» имени
А. И. Ефремова.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г.

на заседании Совета факультета «Автоматизация и механизация производства» на
Трудового Красного ка
имени Н. Э. Баума ца
ская ул., дом 5. н-

Ваши отзывы и ю,
просим высылать п

Ученый секретаря А.
доктор технически

М 249472

Развитие современного машиностроения настоятельно выдвигает в качестве одной из первоочередных задач проблему повышения надежности выпускаемой продукции. Повышение надежности и долговечности изделий неразрывно связано с вопросами увеличения точности обработки и сборки. В этих условиях значительно возрастает роль станкостроения, которое характеризует уровень развития всей машиностроительной промышленности. Рост требований к точности продукции обусловил качественное изменение структуры выпуска станков в пользу прецизионных. Известно, что почти 70% результирующей погрешности изготовления детали связано со станком. В этой связи задача повышения точности самих станков имеет актуальное значение.

Высокая точность и надежность работы станка обеспечиваются качеством изготовления и сборки его наиболее ответственных соединений. Высокой трудоемкостью при сборке станка отличаются прецизионные соединения типа тонкостенная втулка-корпус. Обычно втулки устанавливаются в корпус по посадке с натягом и используются в качестве подшипников скольжения, кондукторных втулок, цилиндрических направляющих шпинделей сверлильных станков и т.п. Функциональные свойства таких соединений в значительной степени определяются параметрами качества внутренней поверхности запрессованной втулки, среди которых ведущее место занимает отклонения формы в продольном и поперечном сечениях.

При сборке с натягом эти показатели качества поверхности могут быть изменены в лучшую или худшую сторону в зависимости от используемого метода сборки, что непосредственно скажется на эксплуатационной надежности соединения. Изучение методов сборки соединений с натягом проводилось ранее с целью определения их прочностных характеристик. Вместе с тем существуют значительные технологические трудности получения соединений с высокой точностью формы отверстия запрессованной втулки, что связано с недостаточной научной проработкой вопросов сборки прецизионных соединений с натягом. Поэтому целью настоящей работы является исследование точностных характеристик методом сборки прецизионных соединений с натягом и изыскание эффективных технологических способов повышения точности и долговечности подобных соединений.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие за-



дачи:

теоретически и экспериментально исследовать отклонения формы отверстия запрессованной втулки в продольно-прессовых и поперечно-прессовых соединениях;

выявить теоретическим и экспериментальным путем условия повышения точности технологических методов сборки за счет при-
менения ориентирования;

определить влияние технологических методов сборки соединений с натягом на их прочность и износостойкость;

разработать рекомендации по использованию методов сборки соединений с натягом в прецизионном станкостроении.

Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции "Совершенствование оборочных процессов в машиностроении" (Киев, 1974г.).

Реферируемая работа состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Материал изложен на 125 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 66 наименований и акт о внедрении результатов работы на предприятиях МС и ИП.

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности соединений с натягом типа втулка-корпус, область их применения, основные требования, предъявляемые к ним, а также технология их сборки.

На основе анализа производственных и литературных данных разработана структурная схема технологической надежности прецизионных соединений с натягом, которая позволила оценить влияние конструктивных и технологических факторов на точностные и прочностные характеристики подобных соединений и на технологическое обеспечение их надежности и долговечности. Тонкостенные втулки устанавливаются в корпус по посадке с натягом в 5-40 мкм, изготавливаются по I классу точности и имеют высокие технические требования на отклонения формы продольного и поперечного сечений (0,002-0,015 мм), а в ряде случаев и на непрямолинейность обра-
зующих (0,005-0,015 мм).

В процессе сборки микрометрическая точность деталей, достигнутая во время механической обработки, может быть потеряна.

В литературе преимущественно рассматриваются вопросы прочности соединений с натягом, а важная проблема прецизионных соединений-точность еще не получила достаточного освещения. Выбор

метода сборки осуществляется исходя из величины натяга и необходимой прочности соединения без учета его точностных характеристик, что приводит на практике к использованию различных методов для сборки одинаковых соединений.

В отдельных работах, посвященных проблеме точности соединений с натягом, указывается, что точностные показатели соединения определяются не одом и условиями сборки, а также первоначальной макрогеометрией собираемых деталей. Однако характер влияния этих факторов на точность соединения не выявлен. Практически отсутствуют сведения о качественной и количественной оценке точностных характеристик методов сборки соединений с натягом и об их влиянии на долговечность таких соединений. Поэтому необходимо проведение специальных исследований с целью разработки рекомендаций, позволяющих производить обоснованный выбор метода сборки прецизионных соединений с натягом с учетом их функционального назначения.

Во второй главе с целью определения влияния методов сборки на деформацию втулки при ее запрессовке в жесткий корпус проведено теоретическое определение отклонений профиля продольного сечения отверстия втулки в продольно-прессовых и поперечно-прессовых соединениях.

В основу теоретических исследований была положена моментная теория осесимметричной деформации тонкостенных оболочек. В качестве объекта исследования было выбрано соединение, в котором втулка имеет вылет из корпуса. Причем, консольную часть втулки можно рассматривать как длинную оболочку. Деформация втулки в продольном сечении непосредственно связана как с конструктивным оформлением соединения с натягом, так и с силовыми факторами, которые характеризуют используемый метод сборки. Для сравнительного анализа деформированного состояния тонкостенной втулки после запрессовки были рассмотрены методы сборки с использованием усилия пресса и метод сборки с применением охлаждения втулки. Все внешние нагрузки и внутренние силовые факторы приложены к срединной поверхности оболочки.

После сборки втулка деформируется неравномерно как по длине сопряжения с корпусом, так и на вылете. Со стороны торца, у которого втулка имеет вылет, на ее внутренней поверхности появляется деформационная волна. С разделением радиальных перемещений

на длине волны осуществлялось в функциях Кривола. В исследованиях предполагалось, что вне пределов деформационной волны на длине сопряжения втулка будет плотно прилегать к отверстию корпуса. Определение эпюры радиальных перемещений оболочки производилось раздельно по двум участкам: на вылете втулки и в пределах деформационной волны. При этом действие участков друг на друга заменялось внутренними силами, также отнесенными к срединной поверхности оболочки.

Для определения радиальных перемещений W оболочки на каждом ее участке получены теоретические зависимости: на вылете втулки -

$$W_{II} = e^{-\beta S} (C_1 \sin \beta S + C_2 \cos \beta S) + G \quad (1)$$

в пределах деформационной волны -

$$W_{II} = \left(\frac{N}{2} + m\right) F(\beta S) + m \quad (2)$$

$$\text{где} \quad F(\beta S) = -1,05(\beta \ell_2) V_4(\beta S) - V_1(\beta S)$$

$$C_1 = \left(\frac{N}{2} + m\right) F_1(\beta S) - \left(\frac{N}{2} + G\right)$$

$$C_2 = -\left(\frac{N}{2} + G\right)$$

$$F_1(\beta S) = 4V_4(\beta S) + \frac{V_1(\beta \ell_2) - 1}{V_4(\beta \ell_2)} V_3(\beta S)$$

$$G = \frac{\mu R_{ср}}{Eh} \chi_1 \quad m = \frac{\mu R_{ср}}{Eh} \chi_1$$

N - натяг в соединении; μ - коэффициент Пуассона; β - параметр оболочки, определяемый по выражению $\beta = \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{8\ell_2^2 h}}$; $R_{ср}$ - радиус срединной поверхности оболочки; h - толщина стенки оболочки; E - модуль упругости первого рода; S - координата длины оболочки; $V_1(\beta S)$, $V_2(\beta S)$, $V_3(\beta S)$, $V_4(\beta S)$ - функции Кривола; ℓ_2 - длина деформационной волны, определяемая графоаналитическим путем; χ_1 и χ_2 - внутренние осевые силы, учитывающие влияние сил трения при запрессовке втулки с использованием продольного усилия.

В выражениях (1) и (2) параметры G и m характеризуют влияние метода продольной запрессовки на величину деформации втулки. Для поперечно-прессового соединения эти параметры равны нулю, что значительно упрощает вышеуказанные зависимости.

Работоспособность соединения, выполняющего функции подшипника скольжения, определяется отклонениями профиля продольного сечения отверстия запрессованной втулки на длине сопряжения втулки с корпусом. Анализ выражения (2) показал, что для конкретного соединения с натягом форма упругой образующей отверстия втулки в пределах деформационной волны определяется функцией $F(\beta S)$. Данная функция по абсолютному значению всегда больше единицы и возрастает с увеличением (βS) . Проведенный анализ и расчеты показали, что длина деформационной волны при продольной запрессовке больше, чем при использовании метода сборки с охлаждением втулки. Следовательно, радиальные перемещения оболочки в продольно-прессовом соединении больше, чем в поперечно-прессовом соединении. Для упрощения расчетов в работе даны табличные и графические материалы, позволяющие определять значения данной функции для конкретных условий.

Для более точного определения длины волны и силовых факторов, действующих на оболочку, разработана система из пяти уравнений, решение которой для ряда соединений с натягом было осуществлено на ЭЦМ БЭСМ-4. Результаты решения показали, что деформация оболочки возрастает с увеличением натяга, величины вылета втулки и с уменьшением толщины стенки втулки. В приведенном выше теоретическом анализе было принято, что материал оболочки изотропный, однородный и подчиняется закону Гука; нагрузка удовлетворяет осевой симметрии; перемещения точек малы по сравнению с толщиной оболочки; осевые перемещения втулки при ее нагревании после охлаждения отсутствуют.

Рассчитанные величины отклонений профиля продольного сечения отверстия втулок сравнимы с величиной рекомендуемых зазоров в прецизионных сопряжениях вал-втулка. Увеличение радиальных перемещений втулки в продольно-прессовых соединениях по сравнению с поперечно-прессовыми предполагает у них более длительный период приработки в процессе изнашивания.

В третьей главе проведено экспериментальное исследование влияния различных конструктивных и технологических факторов на основные характеристики прецизионных соединений с натягом.

Выбор типичных образцов для исследований был осуществлен на основании проведенного анализа производственных и литературных данных. Исследования проводились на бронзовых (Бр.ОЦС 5-5-5) втулках, которые запрессовывались в корпуса, изготовленные из

стали марки Ст.45. Отклонения формы и шершавостей деталей регламентировались одной третью поля допуска размер; номинальный диаметр сопряжения был выбран равным 68 мм; натяги в соединениях обеспечивались сортировкой деталей и назначались в пределах 12-50 мкм. Все образцы тщательно аттестовались по основным точностным параметрам.

В работе приведена методика экспериментальных исследований, которая предусматривает сравнение методов сборки по точностным и прочностным показателям; разработаны критерии оценки результатов экспериментов. Отклонения формы отверстия запрессованной втулки в продольном и поперечном сечениях записывались на кругломерах типа "Калибр-218" и "Талиронд-2". Втулки устанавливались в корпуса с заданной ориентацией.

Для исследований были выбраны следующие методы сборки соединений с натягом: 1) под прессом с постоянной скоростью запрессовки, 2) с использованием винтовых приспособлений с ручным приводом, 3) с применением нагрева охватываемой детали, 4) посредством охлаждения охватываемой детали. Для проведения процесса сборки были спроектированы и изготовлены специальные приспособления и стенд, позволяющий фиксировать величину продольного усилия при использовании винтовых приспособлений. Продольная запрессовка велась с применением направляющих оправок. Охлаждение втулок осуществлялось в жидком воздухе, а нагрев корпусов - в электропечах.

Установлено, что втулка в процессе сборки деформируется неравномерно как в продольном, так и в поперечном сечениях. Деформация втулки зависит от используемого метода сборки, величины натяга, конструктивного оформления соединения, первоначальных погрешностей поверхностей собираемых деталей и их жесткости. При наличии вылета втулки из корпуса на внутренней поверхности втулки обнаружена деформационная волна. В продольно-прессовых соединениях радиальные перемещения втулки на длине волны больше в 1,2 раза, чем в поперечно-прессовых, и возрастают с увеличением натяга. Экспериментальные исследования подтвердили правильность аналитических зависимостей для определения отклонений профиля отверстия втулки и позволили скорректировать их за счет введения экспериментальных коэффициентов, значения которых приводятся в работе.

Наиболее характерной особенностью деформированного состоя-

ния втулки, имеющей равную длину с отверстием корпуса и запрессованной с использованием продольного усилия, является наличие отклонения профиля в виде выпуклости.

Величина отклонения профиля отверстия после запрессовки с постоянной скоростью перемещения втулки в корпусе меньше, чем после сборки с применением винтового приспособления, которая характеризуется прерывистым характером движения втулки. Анализ профилограмм показал, что характер технологического наследования отклонений профиля поверхностей собираемых деталей в значительной степени зависит от метода сборки и нагляднее проявляется в поперечно-прессовых соединениях.

Отклонение профиля отверстия втулки в продольном сечении после сборки методами поперечной запрессовки в 1,3 раза меньше, чем после запрессовки под прессом, и в 1,6 раза меньше, чем после сборки с использованием винтовых приспособлений. В связи с вышесказанным при сборке прецизионных соединений не рекомендуется использовать винтовые приспособления с ручным приводом.

Для изучения точности формы поперечного сечения поверхностей деталей использовался метод гармонического анализа. Исследованиями установлено, что грубые отклонения формы отверстия корпуса, как правило, копируются на внутренней поверхности втулки, если величина натяга больше указанной погрешности. При увеличении точности формы собираемых деталей значительное влияние начинают оказывать отклонения формы поперечного сечения наружной и внутренней поверхностей втулки. Отклонения формы поперечного сечения изготовленных втулок не превышали 8-10 мкм, а отклонения формы отверстия корпуса находились в пределах одной пятой поля допуска на размер сопряжения. Наследование формы отверстия втулки наиболее наглядно проявляется при сборке с малыми натягами (менее 20 мкм) и зависит от применяемого на сборке ориентирования деталей. Определено, что при сборке в наибольшей степени передаются погрешности, характеризующиеся гармониками с частотой не более $n=5$.

Теоретически разработан и экспериментально подтвержден принцип ориентации деталей, позволяющий уменьшить доминирующие погрешности формы поперечного сечения отверстия втулки. Уменьшение величины доминирующей погрешности может быть достигнуто при выполнении следующего условия:

$$\omega_T = \arctg \left(- \frac{A_5 \sin \varphi}{A_n + A_5 \cos \varphi} \right) \quad (3)$$

где ω — рекомендуемый угол сдвига фаз соответствующих гармоник наружной поверхности втулки и отверстия корпуса; ψ — разность фаз между гармониками, описывающими форму поперечного сечения наружной и внутренней поверхностей втулки, для отдельно взятой детали эта величина является постоянной; A_n и A_s — амплитуды гармоник одной частоты наружной и внутренней поверхностей втулки.

В работе определены коэффициенты передачи погрешностей формы поперечного сечения отверстия втулки в зависимости от угла ориентирования и номера гармоники. Ориентирование позволяет уменьшить амплитуду доминирующей гармоники в 4-6 раз. Причем, для продольно-прессовых соединений "исправление" погрешности формы происходит в большей степени, чем для поперечно-прессовых соединений. Обнаруженная особенность продольно-прессовых соединений позволяет рекомендовать этот метод для запрессовки втулок малой длины, а также колец.

При анализе круглограмм установлено, что при увеличении натяг более 20 мкм поперечное сечение втулки на вылете принимает форму, имеющую вид кардиоиды. Уменьшение величины натяга до 12 мкм и увеличение отношения внутреннего диаметра корпуса к наружному с 0,45 до 0,6 исключало появление кардиоиды.

Изучение прочностных характеристик различных методов сборки показало, что сборка с охлаждением втулки обеспечивает наибольшую прочность соединений с натягом; метод сборки с использованием нагрева корпуса не рекомендуется при величине натяга более 30 мкм из-за значительного ослабления посадки; прочность соединений, собранных с применением винтовых приспособлений, примерно в 2 раза ниже, чем прочность посадок, осуществленных с использованием охлаждения.

Экспериментально исследованы величина и распределение контактных давлений в соединениях с натягом. Для контроля контактных давлений был выбран ультразвуковой метод. Результаты исследований контактных давлений подтвердили правильность выбранных в теоретическом анализе расчетных схем нагружения оболочки; показали, что в поперечно-прессовых соединениях величина контактных давлений больше, чем в продольно-прессовых, при одинаково измеренной величине натяга. Проведен металлографический анализ зоны сопряжения соединений с натягом, собранных различными технологическими методами.

В главе четвертой исследовано влияние технологических методов сборки соединений с натягом на их износостойкость по внутренней поверхности запрессованной втулки.

Исследование износостойкости проводилось в условиях, близко имитирующих условия эксплуатации подобных соединений. В этих исследованиях использовалась методика ускоренных испытаний, предусматривающая интенсификацию периодов пуска и торможения. Износные испытания проводились по замкнутому циклу: пуск-кратковременная работа-торможение-останов-пуск. Измерение износа осуществлялось дифференциальным методом радиоактивных индикаторов. Исследование процесса изнашивания бронзовых втулок производилось на специальном стенде. В конструкции стенда было предусмотрено создание радиальной нагрузки на шпиндель с целью моделирования усилий резания. Запрессованные втулки служили в качестве нерегулируемых подшипников скольжения шпинделя испытательного стенда. Цикличность работы стенда обеспечивалась командоаппаратом, который позволял регулировать время одного цикла. В экспериментах была использована радиометрическая аппаратура на базе пересчетного прибора ПИ-12. Втулки облучались потоком протонов с энергией 11,7 мэв на циклотроне физико-энергетического института г. Обнинска.

Определение величины износа велось путем сравнения относительного падения активности облученного пятна во время изнашивания с тарифовочной кривой. Минимальная продолжительность одного цикла, при которой не нарушаются физические условия пускового изнашивания, была определена экспериментально и назначена равной 75 сек.

Изучение динамики изнашивания втулки в период приработки позволило установить, что продолжительность приработки и величина прирабочного износа в значительной степени определяются методом запрессовки втулки. Исследуемые соединения собирались с использованием охлаждения втулки и с применением продольного усилия пресса. Математическая обработка результатов испытаний показала, что продолжительность приработки у продольно-прессовых соединений на 15-25% больше, чем у поперечно-прессовых соединений. Величина прирабочного износа у продольно-прессовых соединений находилась в пределах 5,3-7 мкм, тогда как для соединений, собранных с использованием охлаждения, не превышала 4,8 мкм.

Таким образом, сборка прецизионных соединений с натягом с использованием охлаждения позволяет уменьшить время приработки и сократить операцию технологической обработки, которую изделие проходит на заводе-изготовителе.

Интенсивность изнашивания при установившемся режиме у подшипников скольжения, собранных с охлаждением, была несколько ниже, чем у подшипников собранных под прессом. В среднем, износ подшипников за 100 циклов в период установившегося изнашивания составил: для поперечно-прессовых соединений 0,235 мкм, для продольно-прессовых соединений 0,296 мкм, т.е. в 1,25 раза скорость изнашивания последних выше, чем первых.

Установлено, что величина износа подшипников, собранных с использованием охлаждения, на 10-20% ниже, чем величина износа подшипников собранных с помощью продольного усилия пресса. Это обстоятельство приводит к увеличению межремонтного цикла прецизионных соединений, собранных с охлаждением, на 5-7 месяцев по сравнению с продольно-прессовыми соединениями.

В работе приводятся также данные изменения формы поверхности подшипника в результате изнашивания. Выявлено, что в диаметральной сечении, которое расположено ближе к консольному нагруженному концу шпинделя, отклонения формы значительно больше, чем в других сечениях подшипника. Характер изменения формы образующей подшипника в осевом направлении определяется схемой нагружения вращающегося шпинделя и конструкцией подшипника.

В пятой главе на основании выполненных исследований разработаны практические рекомендации по использованию технологических методов сборки соединений с натягом в прецизионном станкостроении.

Проведен расчет технико-экономического эффекта от внедрения метода сборки подшипников с применением охлаждения.

ВЫВОДЫ

1. Технологический метод сборки прецизионных соединений типа втулка-корпус оказывает значительное влияние на точность и прочностные параметры соединения с натягом и на его надежность и долговечность.

2. В процессе сборки соединения с натягом происходит неравномерная деформация втулки. Установлено, что при наличии в втулке из корпуса, равного 0,4 диаметра сопряжения, на внутренней поверхности втулки образуется деформационная волна протяжен-

ностью от 0,3 до 0,5 длины сопряжения.

3. Выбор метода сборки прецизионных соединений с натягом типа втулка-корпус должен осуществляться с учетом функционального назначения соединения на основе приведенной методики, которая позволяет определить отклонения формы втулок после сборки.

4. Сборку прецизионных соединений с натягом целесообразно производить с применением разработанного принципа ориентирования, который обеспечивает уменьшение доминирующей погрешности формы в 4-6 раз по сравнению с первоначальной. При отклонениях формы, величина которых ограничена одной третью поля допуска на размер, при использовании принципа ориентирования точность формы отверстия в соединениях, собранных под прессом, повышается в 1,3-1,5 раза по сравнению с соединениями, собранными с охлаждением или нагревом.

5. Неравномерная скорость перемещения втулки в корпусе приводит к увеличению отклонений профиля продольного сечения на 20% по сравнению с запрессовкой при равномерной скорости. В связи с этим, при сборке прецизионных соединений с натягом не рекомендуется применять винтовые приспособления с ручным приводом.

6. Прочность соединений, собранных с охлаждением, в 1,4 раза больше прочности соединений, собранных под прессом, и в 1,85 раза больше прочности соединений, собранных с использованием винтового приспособления.

7. Повышение износостойкости нерегулируемых подшипников скольжения на 10-20% может быть достигнуто за счет замены их сборки под прессом сборкой с использованием охлаждения втулки-подшипника перед ее установкой в корпус.

8. В результате проведенных исследований разработаны рекомендации по использованию различных методов сборки прецизионных соединений с натягом в станкостроении. Внедрение разработанных рекомендаций в производство дало годовой экономический эффект в 40 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Г.Монахов Г.А., Жданович В.Ф., Завгородний Ю.П., Серенко В.А.

Рекомендации по применению охлаждения деталей перед запрессовкой, РТМ 203-1266, Оргстанкинпром, М, 1972.

2. Серенко В.А., Фомичева В.Ф. Определение отклонений формы втулок в продольном сечении при запрессовке. Труды МВТУ, № 167, 1973.

3. Завгородний Ю.П., Серенко В.А. Повышение качества и надежности неподвижных соединений. Сб. "Совершенствование сборочных процессов в машиностроении", Тезисы докладов, Укр.НИИНТИ, Киев, 1974.

4. Дальский А.М., Серенко В.А. Технологическая надежность методов сборки соединений с натягом в прецизионном станкостроении. Сб. "Совершенствование сборочных процессов в машиностроении" Тезисы докладов, Укр.НИИНТИ, Киев, 1974.