

М 492180

НА ДОМ
НЕ ВДАЕТСЯ

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЗЕНКИН Анатолий Семенович

УДК 621. 753.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ
МЕТОДАХ СВОРКИ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР)

Специальность 05.02.08 Технология машиностроения

05.02.01 Материаловедение в машиностроении

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1988

Работа выполнена в Киевском технологическом институте легкой промышленности.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Дальский А.М.

доктор технических наук,
профессор, Академик АН УССР
Новиков Н.В.

доктор технических наук,
профессор Федотов А.И.

Ведущее предприятие: Киевское ПО "Красный экскава-
тор".

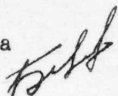
Защита состоится 23 ноября 1988 г. на заседании
специализированного Совета Д 053.15.04 по присуждению ученой
степени доктора технических наук в МВТУ им. Н.Э.Баумана по
адресу: 107005, г.Москва, Б-5, 2-я Бауманская 5.

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

Отзыв на автореферат в I-экз., заверенный печатью, просим
направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан 17 октября 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., доцент



Б.А. Усов

Д-46265 от 31.05.88 г. Объем 2 п.л. Зак. 631 Тир. 100

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана

Актуальность проблемы. Успешное решение поставленных XXV съездом КПСС задач по дальнейшему развитию машиностроения обуславливает необходимость осуществления комплекса мер по интенсификации машиностроительного производства, повышению производительности труда, улучшению качества, надежности и долговечности выпускаемых изделий. Особенно важное значение имеет коренное совершенствование процессов сборки, занимающих значительную долю в трудоемкости производства машин.

В работах Б.С.Балакшина, Б.С.Корсакова, Б.Ф.Федорова, М.П.Новикова, Д.И.Волчекевича, А.Н.Гаврилова, А.М.Дальского, И.А.Клусова, И.А.Коганова, И.М.Колесова, А.И.Федотова, А.А.Гусева, М.С.Лебедевского, В.В.Косилова, В.Н.Оболенского и других показано, что механизация и автоматизация позволяют снизить затраты труда при сборке отдельных видов машин и механизмов до 50% и получить значительный экономический эффект.

Известно, что прочность соединений с натягом, собранных термическими методами (с нагревом или охлаждением), значительно выше прочности соединений, получаемых механической запрессовкой.

В последние годы в различных отраслях машиностроения значительно выросла потребность в использовании сборки с охлаждением. В работах, выполненных в этой области, рассматривались отдельные аспекты использования низких температур для сборки соединений с натягом. Они, в частности, касались вопросов повышения качества посадки прецизионных и тонкостенных деталей, исследования статической и усталостной прочности, разработки технологии и оборудования для автоматической сборки и т.д. Однако без учета всего комплекса действующих технологических связей и зависимостей невозможно разработать методы, которые позволили бы эффективно использовать особенности сборки с охлаждением для обеспечения повышенных прочностных характеристик соединений с натягом с одновременным контролем их несущей способности. При разработке технологического процесса сборки с охлаждением необходимо научное обоснование оптимальных режимов теплового процесса, транспортирования и ориентирования различных по массе, габаритам и свойствам охватываемых деталей, эффективного сборочного оборудования с рациональной структурой и компоновкой, а также назначение технических обоснованных требований к точности, производительности и обес-



печению контроля качества сборки. Необходимость таких научных изысканий многократно подчеркивалась в решениях ГНТК, Всесоюзных и Республиканских конференций и совещаний, поскольку проблема технологического обеспечения сборки соединений с натягом с использованием охлаждения имеет важное народнохозяйственное значение.

Цель работы заключается в разработке технологических основ, необходимых для выполнения высокопрочных и надежных соединений с натягом с использованием низких температур, и создании эффективного оборудования для их сборки и контроля, гарантирующих изготовление изделий требуемого качества в заданном количестве при минимальной себестоимости.

Объекты и методы исследования. Объектом исследований является технология и автоматизация сборки с использованием охлаждения типовых соединений с натягом, применяемых в общем и транспортном машиностроении, а также в станко- и автостроении.

В работе применялся комплексный метод исследования. В теоретической части работы использованы основные положения теории моделирования, теории вероятностей и математической статистики, аналитический метод, позволяющие раскрыть физическую сущность процессов в зоне контакта соединений при сборке с охлаждением, познать механизм и установить общие закономерности изменения акустической эмиссии в зависимости от прочности соединений с натягом, а также разработать методику расчета технологических параметров процесса автоматизированной сборки с временным технологическим зазором.

Значительное внимание уделено экспериментальным исследованиям и производственным испытаниям, выполненным с целью определения статической прочности и предела выносливости соединений с различной технологической подготовкой сопрягаемых поверхностей, уточненных значений коэффициентов трения и деформаций соединяемых деталей, параметров акустической эмиссии, а также проверки теоретических положений на действующих автоматических сборочных и контролирующих установках. При этом применялись тензометрирование и поляризационно-оптические методы. Реализация выбранных методов исследования "теория-эксперимент-практика" была осуществлена в определенной логической последовательности с использованием математических методов и вычислительной техники, позволивших снизить трудоемкость их проведения.

Научная новизна. Решена научная проблема технологического обеспечения качества соединений с натягом при использовании низ-

котемпературной сборки. Решение этой проблемы заключается:

- в теоретическом обобщении и установлении технологических закономерностей получения при сборке с охлаждением высокопрочных, малонапряженных соединений с натягом;

- в получении уравнений для расчета технологических параметров сборки и прочностных характеристик соединений при использовании структурных превращений в стали при низких температурах;

- выявлении закономерностей возникновения и изменения акустической эмиссии при формировании зоны контакта деталей и связи ее параметров с прочностью соединений;

- в изучении физической сущности процесса сборки с уменьшающимся во времени технологическим сборочным зазором и установлении закономерностей изменения размеров деталей при охлаждении, транспортировке, скреплении и формировании натяга, что позволило создать технологические предпосылки ее автоматизации;

- в получении зависимостей изменения физико-механических свойств различных материалов при воздействии на них глубокого холода (до -196°C), что дало возможность разработать рекомендации по проектированию быстродействующих сборочных устройств, исключающих или сводящих к минимуму силовые воздействия;

- в получении эмпирических зависимостей, позволяющих комплексно учесть влияние контактных, теплофизических и акустических процессов, происходящих при формировании зоны контакта, и связать их с прочностью соединений при сборке с охлаждением;

- в создании методики расчета на ЭВМ основных технологических параметров сборки с охлаждением с целью оперативного расчета режимов сборки и выбора рациональной схемы автоматизированного сборочного оборудования.

Практическая ценность:

- разработана методика выбора параметров поверхностного слоя сопрягаемых деталей (шероховатости, микро- и макропрофиля), гальванических покрытий, натяга при структурных превращениях в сталях, обеспечивающих повышенную прочность соединений;

- составлен алгоритм и программа для расчета на ЭВМ технологических параметров с учетом специфики сборки с охлаждением;

- разработаны инженерные методы расчета и проектирования надежного и высокоэффективного автоматического сборочного оборудования с технически обоснованными требованиями к его точности и производительности;

- разработана, создана и прошла промышленное апробирование автоматизированная сборочная установка для сборки соединений редукторов МЦС-100Н с контролем их прочности.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использованы на предприятиях тяжелого, транспортного, автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения для повышения прочности и надежности напрессовки упругих ведомых колес на ось колесной пары, механизации и автоматизации сборки ответственных узлов электроподвижного состава с использованием эффективного 100%-го контроля их прочности, повышения эксплуатационной надежности конического соединения блока машины ВР-1200, составных частей бумагодельных машин, а также для разработки методик, аппаратуры и сборочных устройств, позволяющих использовать преимущества сборки соединений с натягом с низкотемпературным охлаждением.

По результатам работы получено 14 авторских свидетельств СССР и патент ГДР. Общий экономический эффект, полученный от внедрения результатов исследования, составил 540 тысяч рублей. Основные результаты и методы исследований широко используются в учебном процессе. Диссертантом в соавторстве издан учебник "Технология машиностроения легкой промышленности" и т.д.

Публикации. Результаты исследований диссертантом опубликованы в 4-х монографиях, 3-х справочниках, 6 книгах и брошюрах и 72 статьях, изданных в центральных журналах и трудах Всесоюзных научно-технических конференций.

Апробации работы. Диссертация и отдельные ее разделы докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях "Металловедение и термическая обработка" (ЧССР, 1972), "Автоматизация и механизация сборочных работ в машиностроении и приборостроении" (ГДР, 1979), всесоюзных, республиканских научно-технических конференциях. Диссертация обсуждена и одобрена на заседаниях кафедр "Станкостроение" Ленинградского политехнического института и "Автоматизация машиностроения" Северо-Западного политехнического института (Ленинград, 1983), "Технология машиностроения" Киевского политехнического института (1985), на совместном заседании Головного Совета Минвуза РСФСР и Секции сборки научного совета ГКНТ (Москва, 1987).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, основных выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 305 страницах машинописного текста,

содержит 146 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 258 наименований и приложения на 121 страницах.

Глава I. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СБОРКИ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Повышение производительности сборочных процессов и качества соединений с натягом можно обеспечить за счет более широкого и рационального использования термических методов сборки, которые позволяют получить высокопрочные соединения при возможности комплексной механизации и автоматизации этого процесса.

Работы, выполненные В.С.Корсаковым, М.П.Новиковым, М.А.Дальским, Г.Я.Андреевым, Г.А.Бобровниковым и рядом других ученых, внесли значительный теоретический и практический вклад в развитие этих перспективных методов.

Проведенные ранее исследования позволили в определенной степени выявить конструктивные методы повышения статической прочности посадок с натягом, однако предел выносливости таких соединений практически не исследовался. Это не позволяет достаточно объективно судить о влиянии различных технологических факторов на несущую способность и долговечность посадок с натягом. Многие вопросы, касающиеся влияния технологии изготовления соединений на величину и характер распределения контактных давлений, величину коэффициентов трения, статическую и циклическую прочность посадок с натягом и их взаимосвязь, активность фреттинг-коррозии, кинетику развития усталостного разрушения, требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

В технической литературе имеются сведения о том, что повышение прочности соединений при сборке с охлаждением должно включать, прежде всего, выбор оптимальной шероховатости и микрорельефа сопрягаемых поверхностей, однако достаточно обоснованные рекомендации по этому вопросу отсутствуют. При сборке с охлаждением необходимо учитывать также обратимые и необратимые изменения свойств стали в результате структурных превращений при низких температурах. Получение теоретических и экспериментальных значений, связывающих эти изменения с прочностью соединений, представляет научный и практический интерес.

В работах В.И.Максака, Б.Ф.Советченко, Г.Я.Таборкина, Д.Н.Решетова, З.М.Левиной, Г.Я.Андреева и др. рассмотрены различные методы неразрушающего контроля прочности соединений с натягом. Пред-

варительные исследования позволяют предположить, что для контроля качества соединений при термических методах сборки могут быть использованы параметры акустической эмиссии.

Таким образом, исследование технологического обеспечения качества сборки соединений с натягом и разработка их на основе высокопроизводительного и надежного метода контроля прочности соединений с целью осуществления 100%-го их освидетельствования в условиях серийного и массового производства является актуальной научной и практической задачей современного машиностроения. Основные теоретические положения, заложенные в трудах Б.С.Балакшина, В.С.Корсакова, А.Н.Малова, Б.Ф.Федорова, М.П.Новикова, А.Н.Рабиновича, И.М.Колесова, А.М.Дальского, А.И.Федорова, в дальнейшем разрабатывались многими исследователями. Соединение деталей по сопрягаемым поверхностям и вопросы точности при сборке развивались А.А.Гусевым, Д.М.Лебедевским, К.Я.Муцнеком, А.Г.Холодковой, В.Н.Оболенским, В.В.Косиловым, В.А.Яхимовичем, Б.М.Арпентьевым и др.

При проектировании механизированного процесса сборки, основанного на использовании низких температур, следует учитывать ряд специфических особенностей. Анализ факторов, влияющих на процесс автоматизированной сборки с охлаждением, показал, что кроме геометрических параметров при автоматизации процесса сборки первостепенное значение приобретают временной характер изменения линейного размера посадочного диаметра охватываемой детали и формирования натяга.

Таким образом, для повышения качества и эффективности сборки с использованием низких температур требуется решить следующие взаимосвязанные задачи:

- выявить закономерности образования совокупности всех видов связей между технологической подготовкой сопрягаемых поверхностей и процессами, происходящими в зоне контакта, с целью повышения статической и усталостной прочности соединений, получаемых тепловой сборкой с охлаждением;
- создать общую методику расчета режимов сборочного процесса, выбора оптимальной структуры операций, рациональной компоновки автоматизированных сборочных установок и машин;
- предложить новые методы неразрушающего контроля качества соединений и на их основе создать высокоэффективное оборудование для контроля прочностных характеристик в процессе сборки;

- провести опытные конструкторско-технологические работы по созданию технологии и оборудования для автоматической сборки соединений с натягом и осуществить широкое внедрение выполненных разработок в различных отраслях машиностроения.

Глава 2. РАСЧЕТ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДАХ СБОРКИ

Существующие в настоящее время методы расчета соединений с натягом основаны на решении классической в теории упругости задачи Ляме. При этом предполагается, что контактные поверхности соединяемых деталей идеально гладкие и имеют идеально цилиндрическую форму. В действительности же реальные детали всегда имеют отклонения от заданных размеров и формы, а в зоне контакта возникают не только упругие, но и пластические деформации. Прочность соединений с натягом определяется комплексом физических процессов, происходящих в зоне контакта деталей, зависящих от натяга, вида обработки и шероховатости сопрягаемых поверхностей, механических свойств материала, наличия покрытий и пр. В результате действительная прочность соединений, как правило, не совпадает с расчетной. Металлографические и другие исследования показывают, что в зоне контакта при сборке соединений с применением глубокого холода происходит одностороннее внедрение шероховатости охватываемой (охлажденной) детали и сопровождающееся соответствующим переформированием микропрофиля охватывающей детали. Этот процесс является следствием временных (обратимых) изменений механических свойств стали при низких температурах.

Величину внедрения микронеровностей определяют из формулы:

$$U_{вн} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R_{\sigma\delta} \cdot W_{z\delta} \cdot H_{\max\delta}}{K_c \cdot C_\epsilon \cdot \sigma_{sa}} \right)^{1/3},$$

где $R_{\sigma\delta}$, $W_{z\delta}$, $H_{\max\delta}$ - соответственно шероховатость, средняя высота волнистости, максимальная высота неровностей поверхности охватываемой детали; K_c - степень упрочнения; C_ϵ - коэффициент стеснения; σ_{sa} - предел текучести материала охватывающей детали.

В результате теоретических исследований, проведенных в работе, установлены зависимости, с помощью которых можно рассчитать и спрогнозировать прочность посадок соединений с натягом с учетом состояния сопрягаемых поверхностей. Их анализ показывает, что основное влияние на прочность соединений при низкотемпературной сборке оказывают параметры H_u , R_p , t_p , S_m , W_p , H_p .

На основе анализа процессов в зоне контакта предложена методика расчета, связывающая контактные, механические и теплофизические параметры с осевым распрессовочным усилием. Исследованы процессы динамики формирования зоны контакта от напряжений, возникающих в сопрягаемых деталях.

Прочность при распрессовке соединений с натягом, собранных термическими методами, определяется усилием, необходимым для среза шероховатостей сопрягаемых поверхностей в зоне контакта,

$$P = \tau_{cp} \cdot S(1 - \Phi),$$

где Φ - интегральная функция вероятности; S - теоретическая площадь среза; τ_{cp} - касательные напряжения на срезе.

С учетом радиальных деформаций сопряженных деталей площадь среза шероховатостей можно определить по формуле

$$S = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{R_a} \cos \frac{\alpha}{2} \left\{ R_a - \frac{P}{E} \cdot r \left[(1 - \mu) \left(1 + \frac{r^2}{r_2^2 - r^2} \right) + (1 + \mu) \frac{r^2}{r_2^2 - r^2} \right] \right\}$$

После ряда преобразований находим усилие распрессовки

$$P = \frac{\pi d l E \cos \frac{\alpha}{2}}{R_a E + \tau_{cp} \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \left\{ R_a - \frac{P}{E} r \left[(1 - \mu) \left(1 + \frac{r^2}{r_2^2 - r^2} \right) + (1 + \mu) \frac{r^2}{r_2^2 - r^2} \right] \right\} \cdot (1 - \Phi)$$

где E , μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала сопрягаемых деталей; r , r_2 - соответственно радиус сопряжения и внутренний радиус охватываемой детали.

Варьируя параметрами, входящими в уравнение, можно определить оптимальные параметры шероховатости контактирующих поверхностей сопрягаемых деталей и величину сборочного натяга для получения заданной прочности соединений.

Значительным резервом повышения статической прочности посадок с натягом является нанесение гальванических покрытий на сопрягаемые поверхности. Наибольший эффект от применения этих покрытий будет в том случае, если они находятся в пластическом состоянии, а материал основных деталей соединения - в упругом.

На основании теории упруго-пластической деформации толстостенной трубы, приняв критерии пластичности по теории наибольших касательных напряжений, в работе приведены зависимости для расчета перемещения внутреннего радиуса охватывающей и наружного радиуса охватываемой деталей при наличии гальванических покрытий.

Исходя из условия совместности деформаций и учитывая, что

толщина гальванических покрытий не превышает 20 мкм, получены формулы, позволяющие определить давление в зоне контакта

$$p = \frac{N}{d(n_g E_g + n_a E_a)} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sigma'_{sg}/E'_g + \sigma'_{sa}/E'_a}{n_g/E_g + n_a/E_a},$$

где E_g , E_a - модуль упругости материала охватываемой и охватывающей деталей; σ'_{sg} , σ'_{sa} , E'_g , E'_a - соответственно предел текучести и модуль упругости материалов покрытия охватываемой и охватывающей деталей; n_a , n_g - расчетные коэффициенты.

Из приведенной зависимости следует, что давление на контактных поверхностях при наличии гальванических покрытий на одной или обеих сопрягаемых деталях меньше, чем без них, что подтверждается и экспериментальными исследованиями.

Направленные технологические воздействия на поверхностные слои материала вала или оси существенно повышают предел выносливости соединений с натягом. Равномерное распределение контактных давлений и снижение концентрации напряжений обеспечивается также применением различных конструктивных методов.

В работе рассматривается возможность применения для уменьшения фреттинг-коррозии упругих соединений с натягом, которые по своим конструктивным параметрам позволяют снизить напряжения у торцевых участков охватывающей детали. Конструктивной особенностью втулок при таком виде соединений является предварительная проточка кольцевых пазов, которые расчлняют внутреннюю поверхность ступицы на участки, воспринимающие внешнюю нагрузку и деформирующие вместе с поверхностными слоями вала. Для более равномерного распределения перемещений вала и ступицы участки выполняются переменной податливости за счет изменения ширины или глубины пазов.

В работе приведена методика расчета соединений с натягом с учетом воздействия радиальных и термических напряжений, позволяющая оценить качество соединений при термических методах сборки. Предложены рекомендации по определению оптимальных сборочных параметров при наличии двух и более охватывающих деталей с различными физико-механическими свойствами. Дан алгоритм расчета таких соединений.

При термических методах сборки в зоне контакта возникает сила сцепления F , которая препятствует перемещению одной детали относительно другой. В то же время сила F_t , вызванная температу-

рной деформацией, стремится сдвинуть сопрягаемые детали относительно первоначального положения.

Суммарные тепловые деформации в соединении $-\Delta h_z = \Delta h_a - \Delta h_b$; общая продольная деформация после сборки и остывания деталей до температуры окружающей среды $\Delta h_o = U_z + \Delta h_z$. При сборке двух и более охватывающих деталей представляет интерес расчет продольного зазора, вызванного деформациями охватываемых деталей (в момент контакта этот зазор равен нулю). На основе проведенного анализа разработаны рекомендации по достижению оптимальных условий сборки, обеспечивающих минимальный сборочный зазор.

В работе получены зависимости, позволяющие определить натяг в соединениях, сборка которых осуществляется с использованием структурных превращений. Установлено, что изменение диаметра стального вала в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений определяется из выражения

$$d_{ок} = d_n \cdot \sqrt[3]{1 + \frac{\alpha_\gamma}{100} \cdot (U_\alpha - U_\gamma) \frac{1}{U_c}},$$

где α_γ - количество остаточного аустенита в стали; U_α , U_γ - удельный объем мартенсита и аустенита; U_c - удельный объем сплава; $d_{ок}$, d_n - окончательный и начальный диаметры вала.

После соответствующих преобразований расчетный натяг

$$N_{расч} = d_n \cdot \left[\sqrt[3]{1 - \frac{\alpha_\gamma}{100} (U_\alpha - U_\gamma) \frac{1}{U_c}} - 1 \right] - H \pm S_{сз},$$

где H - увеличение диаметра охватываемой детали при пластической деформации, связанной с переформированием микропрофиля контактной поверхности; $S_{сз}$ - минимальный зазор (натяг) в соединении.

Полученные закономерности дают возможность использовать превращения для получения ответственных соединений с натягом. В работе приведено теоретическое обоснование графо-аналитического метода и даны методики построения номограмм для выбора технологических сборочных параметров.

На основании приведенных теоретических зависимостей при расчете и прогнозировании статической прочности и предела выносливости соединений с натягом при сборке с охлаждением можно комплексно учесть не только особенности подготовки поверхностей сопрягаемых деталей, но и специфику формирования зоны контакта, что обеспечивает получение соединений с гарантированными характеристиками.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ПРИ СБОРКЕ С ОХЛАЖДЕНИЕМ

Экспериментальные исследования ставили целью подтвердить предположения о возможности повышения надежности и долговечности этих соединений за счет оптимального выбора технологической подготовки сопрягаемых поверхностей.

Комплексные исследования включали получение сравнительных данных по прочности и коэффициентам трения при распрессовке соединений, собранных с охлаждением, с аналогичными соединениями, сформированными механической запрессовкой и с нагревом. Геометрические параметры и материалы сопрягаемых деталей изменялись в широких пределах. Исследования позволили получить зависимости прочностных характеристик соединений от натяга, шероховатости сопрягаемых поверхностей, микропрофиля, гальванических покрытий и различных видов упрочняющей обработки.

Исследования проводились на экспериментальных и натурных образцах с посадочными диаметрами от 8 до 200 мм. Сопрягаемые детали изготавливались из сталей 20, 45, 38ХНЮА, ХВГ, чугуна СЧ28, бронзы БрАЖ9-4, спеченных материалов ЖГр1, 5Д2, 5Ж0, 4; ЖГр1, 3ДЗКО, 4; ЖГр1, 3ДЗ+($M_o S_{\Sigma}$) 5, алюминиевого сплава АЛ4.

Установлено, что сборка с охлаждением при прочих равных условиях дает возможность повысить прочность соединений в 1,5-2,0 раза по сравнению с механической запрессовкой.

На рис.1 приведены зависимости усилий распрессовки соединений, изготовленных из стали 45, с посадочным диаметром 50 мм и длиной 65 мм, от натяга и шероховатости поверхности охватываемых деталей. Наибольшая прочность соединений на сдвиг достигается при $R_{\alpha} = 2,5 \dots 2,0$ мкм, что в 1,6 раза выше прочности соединений, охватываемые детали которых имеют $R_{\alpha} = 0,125 \dots 0,100$ мкм и на 30% соединений с $R_{\alpha} = 0,8 \dots 0,63$ мкм.

Установлено, что конфигурация неровностей в пределах одного и того же параметра шероховатости при прочих равных условиях (материал, натяг, геометрические параметры и режимы обработки) оказывает существенное влияние на прочность соединений. Так, наибольшую прочность (на 27-30% выше, чем при остальных методах обработки) при сборке с охлаждением можно получить, обработав охватываемую деталь резцами с $\varphi = \varphi_i = 30^{\circ}$ (см. рис.2).

Исследования позволили выявить степень влияния некоторых способов обработки посадочных поверхностей деталей на статическую прочность при приложении распрессовочной силы в осевом направлении или крутящего момента. В табл. I приведены результаты этих исследований. Наилучшие результаты дает сборка с охлаждением при обработке сопрягаемых поверхностей по специальному микропрофилю в виде кольцевых канавок или при нанесении рифления.

Суть предлагаемого способа термического соединения с натягом состоит в том, что на поверхность охватываемой (охлаждаемой) детали в зоне контакта наносят микрорельеф треугольного профиля с углом при вершине 120° , глубиной 0,5–0,8 величины натяга, с углом наклона к оси соединения от 0 до 90° , зависящим от направления нагрузок, приложенных к соединению. Высокая прочность соединения при этом достигается в результате интенсивного внедрения шероховатостей треугольной формы. Сборку рекомендуется осуществлять за счет перепада температур свободным сочленением деталей с зазором, по посадке H/g . Демонтаж таких соединений происходит без разрушения поверхностей сопрягаемых деталей (срез микронеровностей происходит по их вершине), что позволяет использовать детали для повторной сборки.

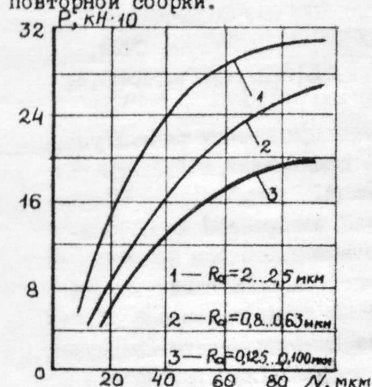


Рис. 1. Прочность соединений в зависимости от натяга и шероховатости поверхности охватываемых деталей

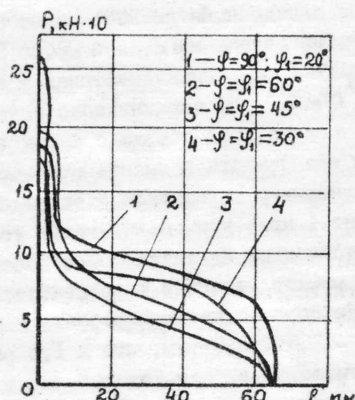


Рис. 2. Прочность соединений при различном микрорельефе поверхности охватываемых деталей при сборке с охлаждением

Значительное внимание в работе уделено исследованию прочностных характеристик соединений при наличии на контактных поверхностях деталей мягких (цинк, медь, кадмий) гальванических покрытий.

Толщина покрытия при исследовании равнялась 15-25 мкм.

1. Влияние технологических факторов на усилие распрессовки, крутящий момент и коэффициенты трения (сцепления) соединений ϕ 50 Н7/р 6 деталей (сталь 45-сталь 45)

Сборка	Сила распрессовки, кН	Крутящий момент, кН · м	Коэффициент трения при :	
			распрессовке	проворачивании
Запрессовкой	92	3,36	0,125	0,178
С нагревом	158	4,86	0,263	0,266
С охлаждением	213	5,91	0,290	0,321
С охлаждением при различной подготовке деталей:				
вал накатан	243	6,25	0,250	0,339
кольцевые канавки на сопрягаемых поверхностях	512	6,14	0,696	0,333
сетчатое рифление поверхностей	364	8,046	0,495	0,437
прямое рифление поверхностей	303	7,71	0,414	0,900

Установлено, что при прочих равных условиях мягкие гальванические покрытия повышают прочность соединений при сборке с охлаждением в 1,8-2 раза. Дальнейшее повышение статической прочности соединений с натягом, как было установлено, достигается за счет нанесения разнородных гальванических покрытий на сопрягаемые поверхности обеих деталей с последующей их термообработкой. Как видно из табл.2, использование двух разнородных гальванических покрытий (медь-цинк) на сопрягаемых поверхностях, позволяет значительно (в 3-4 раза повысить прочность соединений).

Полученные экспериментальные данные (см.рис.3) по прочности соединений при сборке с охлаждением с применением химико-термической упрочняющей обработки (азотирование, цементация) показали, что такая технология позволяет не только сохранить улучшенный поверхностный слой деталей, но и повысить прочность стальных соединений с натягом в среднем в 1,6 раза по сравнению с обычными соединениями, собранными с охлаждением.

Результаты исследований прочности соединений, полученных за счет увеличения объема и размеров охватываемой (охлаждаемой) детали из закаленной стали в результате мартенситного превращения остаточного аустенита при низких температурах, приведены в табл.3. Из этих данных видно, что статическая прочность соединений даже с минимальной толщиной стенки (2 мм) достигает значительной величины, что дает основание рекомендовать указанный метод для сборки ответственных узлов машин.

2. Влияние технологических факторов на прочность соединений $\phi 50H7/r 6$ (сталь 45-сталь 45), собранных с охлаждением

Покрытие		Сила распре- совки, кН	Крутящий момент, кН·м	Коэффициент трения при	
вала	втулки			распрессовке	проворачивании
Цинк		202	5,32	0,398	0,281
Цинк	Цинк	418	8,13	0,555	0,442
Медь	Цинк	464	9,12	0,631	0,496
Цинк*	Медь*	534	11,28	0,725	0,614

*При термодиффузионном отжиге



Рис.3. Сравнительная прочность (в процентах) соединений с натягом при сборке с охлаждением в зависимости от вида химико-термической обработки сопрягаемых поверхностей: I – механическая запрессовка, вал и втулка азотированы; 2,6,8 – без обработки; 3 – азотирован вал; 4 – азотирована втулка; 5 – азотирован вал и втулка; 7 – цементация вала и втулки; 9 – воронение вала; 10 – оксидирование вала (сборка соединений 2-10 осуществлялась с охлаждением)

По результатам исследований разработана номограмма для определения прочности посадок с натягом (рис.4), которая может быть использована в производстве. Расчет прочности соединений с натягом сводится к выбору параметров посадки в зависимости от требуемой прочности соединения.

3. Характеристики соединений с номинальным диаметром 50 мм,
собранных за счет $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений
(Материал охватываемой детали – сталь ХВГ)

Толщина стенки охватываемой детали, мм	Усилие распрессовки, кН	Сравнительная прочность, %
2	19,8	100
5	59,8	300
10	134	677
15	218	1100

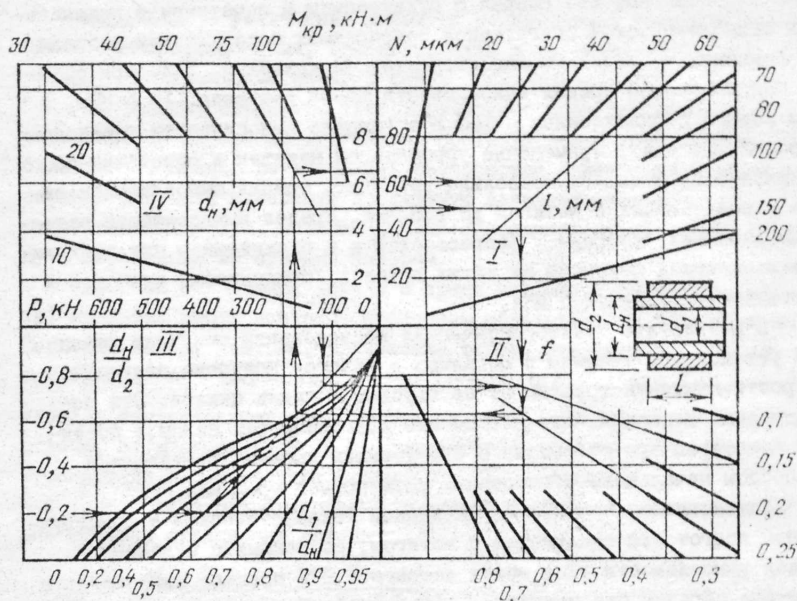


Рис. 4. Номограмма для выбора технологии изготовления и расчета прочности посадок с натягом стальных деталей

Номограмма состоит из четырех квадрантов, в которых приведены основные параметры, влияющие на прочность соединений. Зная геометрические и технологические параметры, можно определить прочность соединений и наоборот.

В работе были проведены специальные эксперименты по определению предела выносливости соединений, собранных различными методами. Исследования проводили на образцах, изготовленных из нормализованной стали 45 с диаметром посадки 60 мм, длиной вала 210 мм, втулки - 140 мм. Втулки растачивали (до $R_a = 1,2 \dots 0,8$ мкм), а валы для соединений под запрессовку и сборку с охлаждением с гальваническими покрытиями шлифовали ($R_a = 1,2 \dots 0,8$ мкм). Валы для обычных соединений, собираемых с нагревом или охлаждением, обрабатывали ($R_a = 2,0 \dots 1,2$ мкм). Цинковое покрытие наносили на поверхности вала и втулки. Парные детали комплектовали по среднему натягу (0,060-0,002 мм); при этом толщина покрытия (8-12 мкм) входила в величину натяга.

Установлено, что сборка с охлаждением в сочетании с оптимальной технологической подготовкой сопрягаемых поверхностей позволяет повысить усталостные характеристики соединений. Так, при сборке запрессовкой предел выносливости валов составил 115,5 МПа, а при сборке с охлаждением - 160 МПа (предел выносливости гладкого образца 190 МПа). Применение упрочняющей накатки в сочетании со сборкой с охлаждением позволило увеличить предел выносливости валов в соединениях с натягом до 175 МПа. Предел выносливости валов в соединениях, собранных запрессовкой и с охлаждением при наличии гальванических покрытий на обеих деталях, практически одинаков и составляет 117,5-122,5 МПа.

В результате фрактографических исследований кинетики развития усталостной трещины в посадках с натягом получена зависимость скорости движения трещины от ее глубины и числа циклов. Эти исследования показали, что увеличение долговечности валов в посадках с натягом при их сборке с охлаждением вызвано замедленным процессом начального образования усталостной трещины.

Установлено, что при определенной технологической и конструктивной подготовке соединений с натягом, собранных с охлаждением, предел выносливости вала может достигать 97% предела выносливости гладкого образца без посадки.

Таким образом, выбор оптимальных параметров шероховатости сопрягаемых поверхностей и конфигурации неровностей, нанесение гальванических покрытий позволяет повысить прочность соединений с натягом за счет специфических, присущих термическим методам, процессов, происходящих в зоне контакта деталей.

Глава 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОБИРАЕМОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ПРИ СБОРКЕ С ОХЛАЖДЕНИЕМ

Установлено, что сборка соединений (рис.5) с предварительным низкотемпературным охлаждением охватываемой детали возможна при обеспечении минимального сборочного зазора

$$S_{сб} = S_{мин} + \Delta d_{мп} + \Delta d_{сор} + \Delta d_{сб} + N_{max},$$

где $S_{мин}$ - минимальный технологический зазор, обеспечивающий свободную установку охватываемой детали с учетом геометрических параметров и углов перекося сопрягаемых деталей при сборке; $\Delta d_{мп}$, $\Delta d_{сор}$, $\Delta d_{сб}$ - увеличение диаметра охватываемой детали в процессе транспортирования, ориентирования и установки (сборки); N_{max} - максимальный натяг в соединении.

Разработка структуры технологического процесса зависит от возможностей выбора хладагента и соответственно температуры охлаждения. Предельно возможная температура охлаждения позволяет заранее получить известную предельную величину сжатия охватываемой детали, которая должна обеспечить качественную сборку с переменным во времени зазором.

Процесс охлаждения детали в среде жидкого хладагента (азота) является нестационарным процессом конвективного теплообмена. Согласно закону Ньютона, количество тепла, отдаваемого деталью при охлаждении $dQ = S_{полн} \alpha'_i (T_i - T_o) \cdot d\tau$, где $S_{полн}$ - площадь теплоотдающей поверхности, m^2 ; α'_i - коэффициент теплоотдачи, $Вт/м^2 \text{ } ^\circ C$; T_i и T_o - соответственно мгновенная температура детали и температура среды, $^\circ C$; τ - время, с.

После ряда преобразований получаем выражение для определения времени охлаждения детали

$$\tau_{охл.} = \frac{d_o \cdot \rho \cdot c_T}{4\alpha'_i} \cdot \frac{\chi_1 (1 - \nu_1)}{\chi_1 + 0,5(1 - \nu_1)} \cdot (-\ln \theta)$$

где ρ - плотность материала детали, $кг/м^3$; c_T - удельная теплоемкость, $Дж/кг \text{ } ^\circ C$; χ_1 , ν_1 - геометрические коэффициенты сопрягаемых деталей; θ - относительная температура.

В критериальном виде

$$\theta = \frac{T_c - T_{mp}}{T_c - T_o} = e^{-2\chi_1 \cdot F_o}$$

М 492180

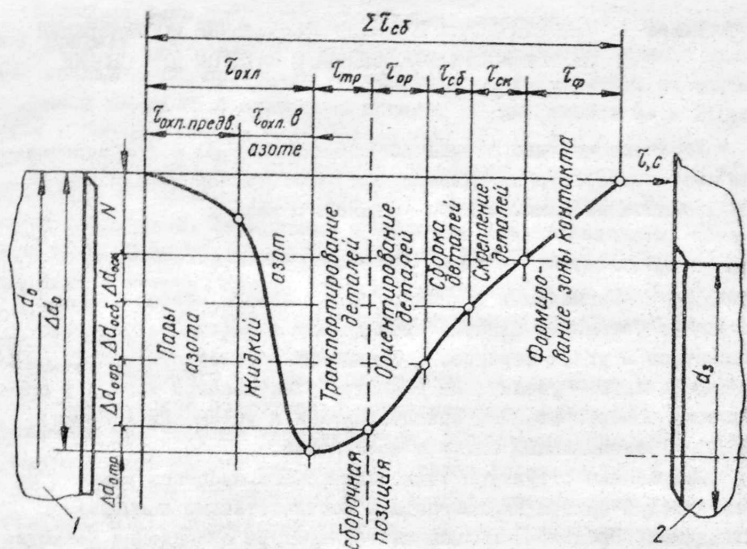


Рис.5. Схема технологического процесса сборки соединений с натягом с использованием охлаждения

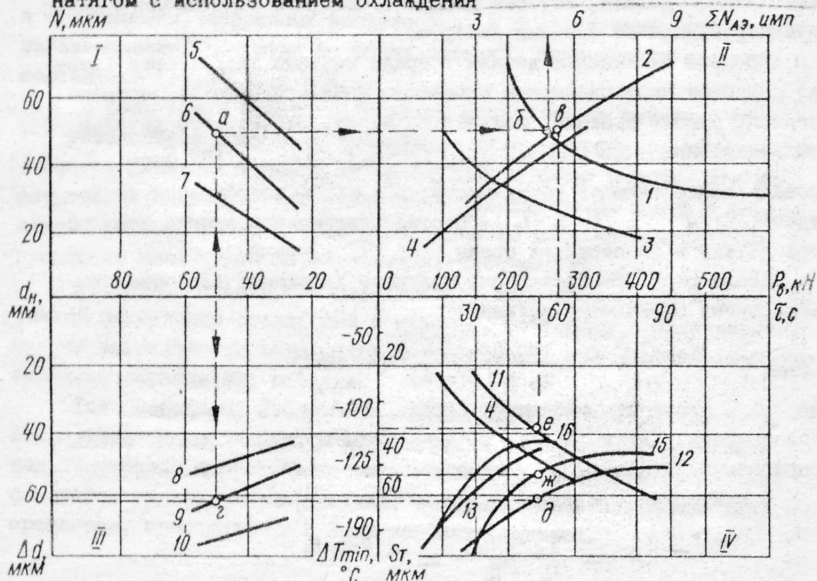


Рис.6. Номограмма для определения технологии сборки и прочности соединений с натягом по параметрам АЗ

где T_{mp} - температура детали в момент совмещения деталей, °C;
 N_c - критерий Нуссельта; F_o - критерий Фурье.

После расшифровки критериев подобия и ряда преобразований получим зависимость для определения минимально возможного времени транспортирования, ориентирования и непосредственно сборки

$$\tau_{mp} = \frac{d_o \cdot \rho \cdot c_r}{4 \cdot \alpha_i} \cdot \ln \frac{(T_c - T_o) \alpha_{cp1} \cdot d_o}{(T_c - T_o) (\alpha_{cp1} - \alpha_{cp}) d_o + N + S_{min}}$$

где α_{cp} и α_{cp1} - средние коэффициенты линейного расширения материала детали в интервале температур соответственно от 196° до 0° и от 0° до 20°C.

Контроль изменения геометрических параметров собираемых деталей можно осуществлять аналитически по допустимому предельному времени выполнения указанных i -х операций.

Скрепление совмещенных деталей при сборке с охлаждением состоит из двух этапов: собственно скрепления (уменьшения зазора между ними до нуля) и формирования натяга. Теплообмен между деталями происходит через поверхность контакта S_k , на который оказывает термическое сопротивление R_T . Поток тепла для охватываемой и охватывающей деталей

$$C_b \cdot m_b \cdot \frac{dT_b}{d\tau} = \frac{2 \cdot S_k \lambda_c}{S_{min}} \cdot (T_a - T_b)$$

$$C_a \cdot m_a \cdot \frac{dT_a}{d\tau} = - \frac{2 \cdot S_k \lambda_c}{S_{min}} \cdot (T_a - T_b)$$

где m_b и m_a - масса охватываемой и охватывающей деталей; T_b и T_a - их температура; λ_c - коэффициент теплопроводности среды между контактирующими поверхностями.

Решив систему уравнений относительно времени скрепления, получим

$$\tau_{скр} = \frac{S_{min}}{2 S_k \lambda_c} \cdot \frac{1}{\frac{1}{C_b \cdot m_b} + \frac{1}{C_a \cdot m_a}} \cdot \left[1 + \frac{1-\theta}{\theta} \cdot \ln(1-\theta) \right]$$

где

$$\theta = \frac{S_{min}}{2 \cdot \Delta T_c} \cdot \frac{C_b \cdot m_b + C_a \cdot m_a}{C_b \cdot m_b \cdot \alpha_a \cdot r_{oa} + C_a \cdot m_a \cdot \alpha_b \cdot r_{ob}}$$

α_s и α_a — коэффициенты линейного расширения материалов охватываемой и охватывающей деталей; r_{0s} и r_{0a} — начальные радиусы посадочного диаметра охватываемой и охватывающей деталей.

Температура в зоне контакта соединения при окончании формирования натяга (теплообменом с окружающей средой пренебрегаем)

$$T_{\varphi} = \frac{c_s \cdot m_s \cdot T_{0s} + c_a \cdot m_a \cdot T_{0a}}{c_s \cdot m_s + c_a \cdot m_a}, \quad (I)$$

где T_{0a} , T_{0s} — температура охватывающей и охватываемой деталей при $\tau = 0$.

Поток тепла через границу раздела задается уравнением

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{1}{R_{\tau}} \cdot S_{\kappa} (T_a - T_s). \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (I) и (2) относительно τ , найдем

$$\tau_{\varphi} = \frac{R_{\tau}}{S_{\kappa}} \cdot \frac{\rho_{\tau} \frac{\Delta T_0 (1-\theta)}{\Delta T_{\varphi}}}{\frac{1}{c_s \cdot m_s} + \frac{1}{c_a \cdot m_a}}.$$

Установленные закономерности процесса сборки с охлаждением охватываемых деталей создали предпосылку для разработки автоматизированных установок для сборки как крупногабаритных (с посадочными диаметрами 80–200 мм), так и малогабаритных (до 50 мм) деталей. Исследования параметров и реализация процесса сборки проводились на экспериментальной автоматизированной установке, позволяющей моделировать процесс сборки (в масштабе 1:5) колесных пар железнодорожного транспорта и на специальных установках бесконтактного ориентирования охлажденных спеченных втулок и седел клапанов двигателей внутреннего сгорания в замкнутом воздушном потоке.

Автоматическая сборка многоэлементных деталей типа веретен (с посадочными диаметрами до 10 мм) осуществлялась на экспериментальной установке с комбинированным воздействием (нагрев и охлаждение) на сопрягаемые детали.

В результате исследований установлено, что предварительно целесообразно охлаждать охватываемую деталь в парах хладагента до -80 – -100°C , а затем производить окончательное охлаждение окусанием (в горизонтальном положении) до требуемой температуры. Величина контактного термического сопротивления R_{τ} зависит от

состояния поверхностей сопрягаемых деталей. При изменении шероховатости от 0,32 до 2,5 мкм R_z изменяется соответственно от $0,78 \cdot 10^{-3}$ до $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{Вт}$. Процесс формирования натяга практически можно считать законченным при перепаде температур сопрягаемых деталей с соизмеримыми массами, равном 5 °С, между деталями с отношением масс 1:5 – 10 °С. Бесконтактное ориентирование и установка охлажденных малогабаритных втулок при скоростном транспортировании позволяют на 90–95% уменьшить их тепловые потери по сравнению со сборкой при помощи устройств с жесткими кинетическими связями; при многоэлементной сборке малогабаритных деталей для уменьшения тепловых потерь целесообразно совмещать операции нагрева и ориентирования охватывающих деталей непосредственно на сборочной позиции.

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили создать математическую модель, позволяющую учитывать изменение технологического зазора во времени для любых условий реализации сборочного процесса, предложить графоаналитические методы расчета параметров, а также разработать алгоритмы и программы для расчета технологических параметров при термических методах сборки с использованием ЭВМ.

Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОПЫТНЫХ И НАТУРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

При термических методах сборки неподвижных соединений в начальный момент формирования натяга происходит контактирование микровыступов сопрягаемых деталей, а затем по мере роста радиального давления, зависящего от величины натяга, дальнейший процесс сближения контактирующих поверхностей. В пятне контакта под воздействием радиального давления и силы трения возникает упруго-пластическая деформация. Это условно вызывает импульс волны напряжения, которая распространяется в сопрягаемых деталях. По мере выравнивания температур радиальное давление возрастает, фактическая площадь контакта увеличивается за счет вступления в соприкосновение новых микронеровностей, меньших по высоте. Каждое пятно контакта генерирует упругую волну напряжения. Волны суммируются и создают суммарную акустическую эмиссию (АЭ). Процесс увеличения числа импульсов акустической эмиссии происходит до момента выравнивания температуры контактных поверхностей деталей

и прекращения роста радиального давления. За этот интервал времени формируется зона контакта.

Можно предположить, что между параметрами $\sum N_{\Delta z}$ и прочностью соединения существует определенная взаимосвязь:

$$\sum N_{\Delta z} = U_r \cdot n_r$$

где U_r - количество перемещений каждого пятна контакта, n_r - количество пятен контакта.

Используя зависимости, предложенные В.А.Грешниковым, Ю.Б.Дроботом с учетом принятых условий прочности на границе контакта сопрягаемых деталей, предлагается следующая формула для расчета суммарного количества перемещений пятна контакта:

$$U_r = \frac{F \cdot \frac{\alpha - m'_a}{n'} \cdot R_o^2 (1 - \mu) \cdot S_k}{p \cdot R_o \cdot \sqrt{2} \cdot E} \exp \left[-\frac{\delta_1}{\sqrt{2}} \left(\tau_\varphi - \frac{R_{o1} - R_o}{c_2} \right) \right] \cdot A_n,$$

где F - сила трения в зоне контакта; α - величина сближения контактных поверхностей; p - контактное давление; A_n - амплитуда колебаний температуры; m'_a , n' , δ_1 , c_2 - расчетные коэффициенты, R_{o1} - радиус вала с учетом половины натяга; μ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости.

Суммарная акустическая эмиссия:

$$\sum N_{\Delta z} = \frac{n_r F \cdot \frac{\alpha - m'_a}{n'} \cdot R_o^2 2(Z_1 - Z_2 R_o \mu) S_c \frac{\beta}{p_c}}{N \cdot R_o \cdot \sqrt{2} \cdot E} \exp \left[-\frac{\delta_1}{\sqrt{2}} \left(\tau_\varphi - \frac{R_{o1} - R_o}{c_2} \right) \right] \cdot A_n$$

где Z_1 и Z_2 - расчетные величины; β - коэффициент опорной кривой; S_c - контурная площадь; p_c - контурное давление в пятне контакта.

Если выразить контактное давление p через $\sum N_{\Delta z}$, то формула, предложенная Н.Б.Демкиным для расчета максимально допустимой нагрузки применительно к соединениям с натягом, принимает вид

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{S_r \cdot n_r \cdot F \cdot R_o^2 (1 + \mu) \cdot \frac{\alpha - m'_a}{n'} \cdot S_c \frac{\beta}{p_c} \cdot c O_2}{\sum N_{\Delta z} \cdot R_1 \cdot R \cdot \sqrt{2} \cdot E} \exp \left[-\frac{\delta_1}{\sqrt{2}} \left(\tau_\varphi - \frac{R_{o1} - R_o}{c_2} \right) \right] A_n^2} \quad (3)$$

Формула (3) достаточно полно учитывает процессы, протекающие в зоне контакта соединений с натягом и дает обоснование использования $\sum N_{\Delta z}$ для оценки прочности соединений.

Исследования, которые проводились при сборке соединений с различными натягами и геометрическими параметрами сопрягаемых

деталей, позволили подтвердить теоретические выводы и взаимосвязь параметров акустической эмиссии с прочностью соединений. Так, при исследовании соединений из стали 45 с посадочными диаметрами 50 мм, собранных с натягом 30, 50 и 70 мкм, при минимальном натяге было зафиксировано 12000 имп, а при максимальном — 4000. Прочность на сдвиг указанных соединений составила соответственно 159 и 470 кН.

У соединений с максимальным натягом зарегистрирована максимальная интенсивность излучения АЭ 250 имп/с, а с минимальным — 100 имп/с.

Промышленное апробирование предложенного метода проводилось при сборке несущих узлов вал-зубчатое колесо редукторов с номинальными диаметрами, равными 32 и 50 мм, колесных пар железнодорожного состава с посадочным диаметром 196 мм, а также при посадке бандажа с посадочным диаметром 900 мм на спицевый центр. Использование аппаратуры показало универсальную возможность ее применения для контроля соединений с натягом. Для оценки качества сборки соединений в производственных условиях был разработан графо-аналитический метод, основанный на сравнении получаемых параметров АЭ с заранее известными контрольными.

На рис.6 показана номограмма для определения прочности соединения вал-втулка в зависимости от сборочных параметров и суммарного количества сигналов АЭ. Номограмма состоит из 4-х квадрантов. Зная диаметр сопряжения и возможные при этом изменения величин максимальных, средних и минимальных натягов (на графиках обозначены цифрами 5, 6 и 7), можно для конкретного случая (квадрант II) найти величину суммарной АЭ и прочность соединения. Номограмма позволяет также определить величину сжатия вала при различных температурах (квадрант III) и время формирования соединений (квадрант IV). Определяемые таким образом параметры АЭ являются контрольными и могут быть использованы для оценки качества сборки в условиях производства.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что продолжительность излучения АЭ совпадает с продолжительностью выравнивания температур в зоне контакта в соединениях, собранных термическими методами; суммарная АЭ обратно пропорциональна натягу в соединении и прямо пропорциональна площади контакта; для оперативного контроля качества процесса фор-

мирования соединений при сборке с охлаждением целесообразно использовать интенсивность излучения сигналов АЭ ($\dot{N}_{АЭ}$);

Глава 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан алгоритм типового технологического процесса сборки соединений с термовоздействием, который может быть использован в массовом и крупносерийном производстве. Для практических целей разработана методика расчета основных технологических параметров процесса сборки соединений с охлаждением, которая применима для изделий, различных по геометрическим параметрам.

Технология и оборудование, созданные на основе новых решений, защищенных авторскими свидетельствами, прошли промышленное апробирование и внедрены для использования таких ответственных изделий, как редукторы тяговых двигателей электропоездов типа ДК-103, колесные пары железнодорожного состава типа РУ-1, несущие узлы редукторов типа МД2С-100Н и др.

Предложенная методика расчета экономической эффективности позволяет учесть все аспекты внедрения новой технологии сборки с использованием охлаждения.

Показано, что дальнейшее развитие сборки с охлаждением основывается на внедрении быстропереналаживаемых сборочных систем, охлаждающих устройств, роботов и манипуляторов для транспортирования и ориентирования охлажденных деталей. Примером такого решения могут быть технологический процесс и оборудование для сборки веретен типа H_2-2 колыцепрядильных машин.

Технико-экономический анализ и результаты внедрения исследований в промышленность позволяют утверждать, что сборка с охлаждением в целом ряде случаев обеспечивает качественное решение технических задач со значительным экономическим эффектом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате теоретических и экспериментальных исследований в настоящей работе автором решена научная проблема выбора, назначения и технологического обеспечения оптимальных парамет-

ров сборки с применением низких температур, что в сочетании позволяет создать высокопрочные малонапряженные соединения с натягом. Реализация данного решения при изготовлении ответственных изделий машиностроения имеет большое народнохозяйственное значение и является дальнейшим развитием основ технологии машиностроения.

На основании теоретических и экспериментальных исследований закономерностей сопряжения деталей при термических методах сборки сделаны следующие выводы.

1. Раскрыты закономерности протекания процессов в зоне контакта как при формировании, так и при разрушении соединений с натягом, сборка которых осуществлялась с использованием низких температур и различных видов технологического воздействия на поверхность сопрягаемых деталей. Предложены теоретические зависимости, позволяющие рассчитать технологические сборочные параметры соединений, осуществляемых с использованием структурных $\delta \rightarrow \infty$ превращений при температуре глубокого холода.

Полученные результаты позволяют обосновать возможность повышения прочностных характеристик соединений и установить ряд принципиально новых научных положений:

- метод сборки оказывает существенное влияние на распределение напряжений по длине соединения; более равномерно контактные давления распределены при низкотемпературной сборке;
- мягкие гальванические покрытия уменьшают контактные давления по сравнению с обычными соединениями на 25%, распределение контактных давлений по длине соединения примерно одинаково;
- при сборке с охлаждением происходит переформирование как микронеровностей охватывающей детали, так и ее формы;
- интенсификации процесса внедрения микронеровностей охватываемой детали способствует временное повышение напряжений в зоне контакта, вызванное изменением размеров деталей в результате теплообмена между охлажденным валом и втулкой, находящейся при нормальной температуре;

- увеличение размеров охватываемых деталей при $\delta \rightarrow \infty$ превращениях обеспечивает качественную сборку тонкостенных деталей.

2. Получены новые, более точные данные о прочности и коэффициентах трения соединений, изготовленных с помощью перспективных термических методов и специальных методов подготовки сопрягаемых поверхностей деталей. Установлено, что выбор рационально-

го способа обработки шероховатости поверхности, толщины гальванических покрытий и конфигурации микронеровностей позволяет повысить статическую прочность соединений с натягом на 20-60% по сравнению с прочностью соединений, собираемых термическими методами по существующей технологии. Дальнейшего повышения прочности соединений с натягом можно достичь путем нанесения на поверхность сопрягаемых деталей разнородных гальванических покрытий с последующим применением специальной термической обработки (термодиффузионного отжига). Прочность таких соединений в 1,5-2 раза выше, чем соединений с одним гальваническим покрытием, и в 5-6 раз больше, чем соединений, собранных запрессовкой.

3. На основе предложенной физической модели контактных перемещений микронеровностей поверхностей сопрягаемых деталей при термических методах сборки и возникающей в зоне контакта акустической эмиссии получены зависимости, позволяющие рассчитать прочность соединений с натягом. Методика расчета прочности по суммарному числу импульсов акустической эмиссии дает возможность учесть в комплексе влияние контактных, теплофизических и акустических процессов на качество соединений при термических методах сборки. На основании исследований доказаны следующие научные положения:

- время выравнивания температур в контактных поверхностях сопрягаемых деталей совпадает со временем излучения акустической эмиссии в зоне контакта при низкотемпературной сборке; выравнивание температур в контактных поверхностях приводит к прекращению акустической эмиссии;

- значение суммарной акустической эмиссии изменяется в зависимости от величины натяга, числа пятен контакта, колебаний температуры в газовой прослойке между контактными поверхностями и геометрическими параметрами соединения;

- между суммарной акустической эмиссией и максимально допустимым осевым усилием распрессовки существует количественная взаимосвязь, позволяющая оперативно контролировать ход технологического процесса сборки и качество формируемых соединений.

4. На основе расчетов и экспериментальных исследований получены зависимости, с помощью которых можно определить эксплуатационные свойства соединений с натягом. При этом установлено:

- сборка с охлаждением по сравнению со сборкой запрессовкой позволяет снизить эффективный коэффициент концентрации напряжений с 1,62 до 1,19, уменьшить влияние фреттинг-коррозии и увеличить усталостную прочность на 30-70%;

- скорость развития усталостной трещины в охватываемой детали не зависит от метода сборки, но вероятность появления трещин при сборке с охлаждением значительно уменьшается;

-при упругом соединении с натягом практически устраняется влияние фреттинг-коррозии, предел выносливости повышается до 97% предела выносливости гладкого контрольного образца.

5. Получены закономерности образования совокупности структурных связей, действующих в процессе сборки соединений с натягом с использованием термических методов, и на их основе разработана общая методика оценки количественной зависимости между требуемым качеством любого соединения, расчетными значениями режимов сборочного процесса и необходимой для соединения точностью относительно положения сопрягаемых поверхностей. При этом установлен ряд новых научных положений:

-качество сборки соединений с натягом при помощи термических методов определяется взаимодействием пространственных, силовых и временных параметров этого процесса и зависит от совокупности действующих факторов, в частности, геометрических параметров и физико-механических свойств сопрягаемых деталей, точности ориентирования, продолжительности транспортирования и совмещения деталей, а также условий теплообмена;

- рациональным способом сборки соединений с малогабаритными втулками является комбинированный (нагрев охватываемой и глубокое охлаждение охватываемой деталей) в сочетании с бесконтактным ориентированием и высокоскоростным транспортированием на сборочную позицию; взаимосвязь временных и тепловых режимов сборочного процесса позволила обосновать применение для ориентирования и установки охлажденных малогабаритных втулок нового метода, обеспечивающего качественное выполнение операций за счет использования замкнутого потока воздуха.

6. Результаты проведенных исследований внедрены на предприятиях Минтяжмаша СССР, Минавтопрома СССР, Минстанкопрома СССР, Минхиммаша СССР, а также на предприятиях других отраслей народного хозяйства. Предложенная технология и оборудование для сборки соединений с натягом термическими методами обеспечивает повышение качества и позволяет значительно увеличить надежность таких изделий, какими являются составные части картоноделательных машин К-27, беспыночное соединение несущих узлов цилиндрических ступенчатых редукторов типа Ц2У-315Н, МЦРС-100Н, соединение маховика с вибровалом подбивочного блока машины ВПР-1200, соединения упругих ведомых колес с осью колесной пары тепловозов и т.д.

Экономический эффект внедрения результатов исследований составил 540 тыс.руб.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Зенкин А.С., Арпентьев Б.М. Сборка неподвижных соединений термическими методами.- М.: Машиностроение, 1987.- 128 с.
2. Зенкин А.С. Механизация и автоматизация тепловой сборки соединений с натягом // Механизация и автоматизация сборки в машиностроении / А.В.Воронин, А.И.Гречухин, А.С.Калашников и др.- М.; 1985.- Гл.6.- С.166-192.
3. Алтухов В.Я., Зенкин А.С., Кантур В.Г., Осадчук Ф.И. Ремонт электроподвижного состава железнодорожного транспорта /Под ред.А.С.Зенкина.- Киев: Техніка, 1983.- 150 с.
4. Зенкин А.С., Гулько Л.М., Михайленко Л.Ф. Технология машиностроения легкой промышленности: Учебник.- Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1985.- 222 с.
5. Зенкин А.С. Технологические основы сборки соединений с натягом.- М.: Машиностроение, 1982.- 48 с.
6. Зенкин А.С. Интенсификация технологических процессов в машиностроении с использованием низких температур.- М.: Машиностроение, 1985.- 62 с.
7. Зенкин А.С. Механизация и автоматизация сборочных работ в машиностроении. Об-во "Знание" УССР.- Киев, 1981.- 28 с.
8. Швиденко В.И., Зенкин А.С. Использование минусовых температур для интенсификации технологических процессов на машиностроительных предприятиях.- Киев: УкрНИИТИ, 1982.- 47 с.
9. Новиков М.П., Зенкин А.С. Совершенствование сборочных процессов в машиностроении // Вестник машиностроения.- 1974.- №12.- С.30-35.
10. Zenkin A.S. Einfluss technologischer Faktoren auf die Festigkeitszeit und die Zuverlässigkeit von Preßverbindungen // Fertigungstechnik u. Betrieb.- 1976.- Bd. 26, №6.- S. 261-263.
11. Zenkin A.S., Blume F., Jachau H. Folgen von Preßverbindungen bei der Herstellung von Fertigungseinrichtungen // Fertigungstechnik u. Betrieb.- 1976.- Bd. 26, №12.- S. 750-753.
12. Kurbatov S., Kanturn W.G., Zenkin A.S. Bewertung der Haltbarkeit von Verbindungen mit Übermaß mit Hilfe der akustischen Emission // Fertigungstechnik u. Betrieb.- 1985.- Bd. 35, №1.- S. 270-272.

13. Бобровников Г.А., Зенкин А.С. Применение биметаллических поддипников в машинах легкой промышленности // Изв.вузов.- Лег.пром.-1970.- №5.- С.147-149.
14. Бобровников Г.А., Зенкин А.С., Михайленко Л.Ф. Статическая прочность соединений с гарантированным натягом при разнородных гальванических покрытиях // Респ.межвед.научн.-техн. сб-к.- Киев,1973.- №2.- С.12-16.
15. Бобровников Г.А., Зенкин А.С. Расчет натягов для соединений, осуществляемых при низких температурах // Вестник машиностроения.-1970.- №4.- С.55-57.
16. Бобровников Г.А., Зенкин А.С. Сборка тонкостенных облицовок с использованием структурных превращений стали при низких температурах // Изв.вузов. Машиностроение.- 1970.- №8.- С.188-192.
17. Зенкин А.С., Замша А.Л., Климаш В.Г. Номограммы для определения возможности термической сборки соединений с натягом // Вестник машиностроения.- 1984.- №5.- С.59-60.
18. Зенкин А.С., Оборский И.Л. Влияние низких температур на прочность и пластичность спеченных материалов, применяемых в машиностроении // Изв.вузов.Машиностроение.-1978.- №10.-С.105-108.
19. Зенкин А.С., Оборский И.Л., Климаш В.Г. Определение параметров процесса сборки соединений деталей с натягом с временно образуемым зазором // Изв.вузов.Машиностроение.-1983.- №11.- С.140-143.
20. Исследование контактной поверхности деталей и моделей, соединенных тепловыми методами / Г.А.Бобровников, А.С.Зенкин, Ю.Д.Рубиш, В.Н.Савченко // Изв.вузов.Машиностроение.-1971.- №5.- С.65-69.
21. Использование низких температур при запрессовке в головки блоков направляющих втулок и седел клапанов / В.Н.Оболенский, А.С.Зенкин, И.Л.Оборский, И.В.Стороженко// Авт.про-во.- 1984.- №8.- С.13-14.
22. Разинков А.И., Зенкин А.С. Время формирования соединений с натягом при термических методах сборки // Изв.вузов. Машиностроение.- 1982.- №3.- С.137-141.
23. Зенкин А.С., Кантур В.Г., Козелло Н.Л. Акустический метод

контроля качества соединений с натягом // Изв. вузов. Машино-
строение. - 1985. - №5. - С.151-154.

24. Разинков А.И., Кантур В.Г., Зенкин А.С. Полуавтомат для сборки роторов электродвигателей с охлажденными валами // Мех-ция и авт. пр-ва. - 1979. - №3. - С.4-5.
25. Ас. 703297 СССР, МКИ² В 23 Р 19/04. Устройство для сборки цилиндрических деталей / А.С.Зенкин, И.Л.Оборский. - №2428384/25-08, заявлено 08.12.76; Опубл. 15.12.79, Бюл. №46. - 3 с.
26. А.с. 573314 СССР, МКИ² В 23 Р 19/02. Устройство для сборки деталей / Г.А.Бобровников, А.И.Разинков, А.С.Зенкин и др. - №2171519/25-08; Заявлено 08.09.75; Опубл. 25.09.77, Бюл. №35. 4 с.
27. А.с. 672561, МКИ² G 01 N 29/04. Способ неразрушающего контроля качества соединений / А.И.Разинков, И.Н.Пономаренко, А.С.Зенкин и др. - №2404012/25-28; Заявлено 09.09.76; Опубл. 05.07.79 Бюл. №25. - 2 с.
28. А.с. 912474 СССР, МКИ³ В 23 Р 19/02. Устройство для термической сборки прессовых соединений деталей типа вал-втулка / А.И.Разинков, А.С.Зенкин, В.Г.Кантур. - №2954090/25-27; Заявлено 09.07.80; Опубл. 15.03.82, Бюл. №10. - 3 с.
29. А.с. 1067315 СССР, МКИ³ F 25 D 3/10. Устройство для глубокого охлаждения штучных изделий / Б.Т.Волков, А.С.Зенкин, В.И.Кадури и др. - №3452741/28-13; Заявлено 11.06.82; Опубл. 15.01.84, Бюл. №2. - 3 с.
30. А.с. 1181845 СССР, МКИ⁴ В 23 Р 19/02. Устройство для сборки запрессовкой // А.С. Бойко, А.С.Зенкин, В.И.Гречанюк и др. - №3702894/25-27; Заявлено 02.01.84; Опубл. 30.09.85, Бюл. №36. - 3 с.
31. А.с. 1146169 СССР, МКИ⁴ В 23 Р 41/02. Способ термического соединения с натягом охватываемой и охватывающей деталей / А.С.Зенкин, А.Л.Замша, В.Г.Климась. - №3702119/25-27; Заявлено 02.01.84; Опубл. 23.03.85, Бюл. №11. - 3 с.
32. А.с. 1269963 СССР, МКИ⁴ В 23 Р 19/02. Способ сборки цилиндрических втулок и устройство для его осуществления / А.С.Зенкин, И.Н.Лештан, И.Л.Оборский и др. - №3842945/25-27; Заявлено 14.01.85; Опубл. 15.11.86, Бюл. №42. - 3 с.
33. А.с. 1333527 СССР, МКИ⁴ В 23 Р 19/02. Устройство для сборки прессовых соединений деталей типа вал-втулка / А.С.Зенкин, В.А.Ваховский, Н.П.Стародуб. - №4050662/31-27; Заявлено 04.04.86; Опубл. 30.08.87, Бюл. №32. - 3 с.