

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Резніченко Микола Кирилович

УДК 621.921:621.923

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПРОЦЕСАХ СКЛАДАННЯ ТА РОЗБИРАННЯ З
ІНДУКЦІЙНИМ НАГРІВОМ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українській інженерно-педагогічній академії (УІПА) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Арпентьєв Борис Михайлович,
Українська інженерно-педагогічна академія (м.Харків),
професор кафедри „Технологій та управління якістю в
машинобудуванні”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зенкін Анатолій Семенович,
Київський національний університет технології та
дизайну, завідувач кафедри метрології, стандартизації і
сертифікації, Міністерство освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор
Михайлов Олександр Миколайович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри технології машинобудування,
Міністерство освіти і науки України;

заслужений діяч науки і техніки України, лауреат
Державної премії України, доктор технічних наук,
професор
Мовшович Олександр Якович,
Науково-виробниче підприємство “Оснастка”
(м.Краматорськ), Міністерство промислової політики
України, заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться „15” листопада 2007р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розіслано „13” жовтня 2007р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найважливішою проблемою машинобудівного комплексу України є підвищення конкурентоспроможності продукції за рахунок поліпшення її якості при зменшенні собівартості. Державна програма «Ресурсозберігаючі технології і новітнє обладнання в енергетиці» вимагає створення як принципово нових технологій, так і розвитку сучасних, зокрема зниження енерговитрат і дотримання екологічної чистоти при їх впровадженні.

Для складального виробництва, яке становить до 40% від загальної трудомісткості виготовлення виробів, цей напрям особливо актуальний.

З'єднання з натягом, що є четвертими по поширеності з'єднаннями, при технології збирання з нагрівом мають вищу міцність і надійність, ніж отримувані запресовкою. Це забезпечило їм широке розповсюдження у важкому, транспортному, енергетичному, хімічному, нафтовому машинобудуванні, судноремонті і інших галузях машинобудування. Такі з'єднання зазвичай і розбираються тільки з використанням нагріву, оскільки розпресовка часто призводить до пошкодження деталей. Особливо ефективною є технологія з прямим індукційним нагрівом струмами промислової частоти із-за зручності подачі і стабільності характеристик енергоносія, відсутності забруднення середовища, можливої високої концентрації потужності, гнучкості управління, точності регулювання температури та інших факторів.

Проте технології з нагрівом досить енергоємні. Існуючі теоретичні розробки і практичні рекомендації пов'язані з конкретними виробами і конкретними типами процесів складання або розбирання. Питання енергетики нагріву і якості процесів не носили системний характер, не розглядалися з єдиних позицій. Це не дозволило виявити всі можливі шляхи поліпшення таких процесів. Тому наявні в цій галузі наукові положення по розробці технологічних процесів (ТП) для нових виробів можуть бути використані лише частково, внаслідок чого недоліки технологій і індукційно-нагрівального устаткування виявляються у кращому випадку на експериментальній стадії їх розробки.

Вимоги отримання виробів високої якості сприяють переведенню більш складних з'єднань з натягом з технології запресовки і розпресовки на технологію з індукційним нагрівом, що робить необхідним підвищення її ефективності.

Отже, нині об'єктивно постала науково-технічна проблема підвищення якості складання і розбирання з'єднань з натягом при одночасному зниженні енерговитрат, що неможливо без теоретичних розробок і науково обґрунтованих практичних рекомендацій. Проблема має важливе народногосподарське значення, оскільки її вирішення дозволить створити конкурентоспроможні, екологічно чисті технологічні процеси, надійне устаткування високого технічного рівня з малим енергоспоживанням для різних галузей машинобудування.

В основу роботи покладено наукову ідею побудови технологій і устаткування, складання і розбирання з'єднань з натягом при використанні індукційного низькотемпературного нагріву деталей на загальних принципах уніфікації, якості та енергозбереження. Вона базується на конструктивній і технологічній схожості з'єднань – вали і втулки з посадочними поверхнями, нагрів охоплюючої деталі, жорсткий часовий зв'язок між технологічними переходами в операціях, що змінюють тепловий стан з'єднань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Напрямок досліджень пов'язаний із держбюджетними темами ДР № 0105U001951 «Створення технологій та устаткування індукційного нагрівання складних виробів для роз'єднання на елементи» та ДР № 0105U008503 «Разробка керованого процесу частотно-імпульсного технологічного індукційного нагріву виробів з компенсованою реактивною потужністю», які виконуються в пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі». Робота пов'язана з виконанням госпдоговорів: Архангельський судноремонтний завод «Красная кузница» (1974р., 1983р.), Чорноморський суднобудівний завод та завод ПТО (м. Миколаїв, 1973р., 1979р.), Кишинівський машзавод та Машинобудівний завод «Бакинский рабочий» (м.Баку, 1975р, 1984р.), Ризький та Мангальський судноремонтні заводи (м. Рига, 1975р., 1978р., 1983р), Бакинський машзавод ім. Леніна (1975р., 1984р.), Судноремонтний завод м.Сов.Гавань (1979р., 1988р.), Кемеровський завод «Строймашина» (1980р.), Астраханський тепловозоремонтний завод (1981р., 1986р.), Камишбурунський залізорудний комбінат (м.Керчь, 1985р., 1986р.) Електровагоноремонтний завод (м. Тбілісі, 1986р.), Даугавпілський локомотиворемонтний завод (1987р., 1990р.), Ташкентський тепловозоремонтний завод (1988р.), Об'єднання «Имексин» (Куба, 1990р), Дніпропетровський та Уфимський тепловозоремонтні заводи (1990р.), Моторвагонне депо „Фастів-1”, м. Фастів (2004р.), Пасажирське вагонне депо „Харків-Сортувальний” (2004р.), ДВАТ „Павлоградське налагоджувальне управління” (2005р.), Попаснянський вагоноремонтний завод , м.Попасна (2005р.).

Мета і задачі досліджень. Підвищення якості і зниження енерговитрат у технологіях складання та розбирання з'єднань з натягом при індукційному нагріванні за рахунок систематизації, типізації та уніфікації при побудові процесів та обладнання.

Для реалізації поставленої мети було визначено основні завдання :

- визначити галузь використання технологій складання з нагрівом, проаналізувати найбільш поширені типи складальних одиниць з'єднань з натягом, та запропонувати їх систематизацію і класифікацію охоплюючих деталей за ознакою ефективності індукційно - теплового складання та розбирання;

- розглянути часові, енергетичні та інформаційні взаємозв'язки в технологіях, в яких використовується нагрівання, і на цій основі визначити типи технологій та операції складання і розбирання з'єднань, а також запропонувати комплексну оцінку якості технологічних систем, що їх реалізують;

- дослідити нестационарні теплові процеси, що відбуваються при індукційно-тепловому формуванні та розформуванні з'єднань, і на цій основі розробити моделі, які дозволяють визначити кількість, потужність та періодичність дії джерел тепла і розрахувати температурні та часові режими;

- визначити, на основі дослідження процесу нестационарного теплообміну, коефіцієнти теплопередачі між деталями з'єднання при їх з'єднанні або роз'єднанні для розрахунку часових режимів;

- запропонувати моделі оптимізації локального нагріву охоплюючих ступінчастих вісесиметричних та плоских невісесиметричних деталей за критерієм мінімуму теплових витрат, при збереженні якості металу;

- типізувати індукційні нагрівачі, визначивши галузі їх раціонального застосування, запропонувати та дослідити модель надійності індукторів, які працюють під впливом випадкових навантажень, а також розробити методику їх розрахунку;

- виконати дослідно - промислові розробки по створенню технологій та індукційного устаткування для нагріву деталей при складанні та розбиранні, та здійснити їх впровадження в різних галузях машинобудування.

Об'єкт дослідження – процеси складально-розбирального виробництва з'єднань з натягом.

Предмет дослідження - енергозбереження і якість технологій складання та розбирання з індукційним нагрівом.

Методи досліджень. Методологічною основою роботи є системний аналіз і комплексний розгляд робочих процесів складання і розбирання. Для вирішення поставлених завдань використовувалися фундаментальні положення технології машинобудування, термодинаміка і електротехніка, теорія ймовірностей і математична статистика, положення загальної теорії якості, сучасні положення теорії управління, стандартизація.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів. На основі запропонованих загальних технологічних принципів, що об'єднують процеси складання та розбирання, їх уніфікації та типізації, досліджень часових, енергетичних та інформаційних залежностей, створено технологію та індукційне обладнання для низькотемпературного нагрівання деталей, які забезпечують високу якість виробів при енергозбереженні.

Це базується на таких наукових розробках:

- систематизації конструкцій з'єднань за ознакою складності використання індукційного термовпливу, а також рекомендацій по

конструюванню вісесиметричних деталей з маточинами, які дозволяють при локальному нагріві економити енергію водночас із збереженням якості;

- встановленні загальних принципів уніфікації операцій складання і розбирання з двох- і багатоелементними складальними одиницями за ознаками базування і розташування деталей в з'єднанні, напрямком і видом силової дії, послідовності переходів;

- виявленні закономірностей дискретного індукційного нагріву виробів на підставі розгляду з'єднання як багатокомпонентної системи з нестаціонарним теплообміном між деталями, які дозволили визначити часові режими процесів збірки або розбирання;

- моделей оптимізації розподілу питомої потужності джерел тепла по поверхні деталей будь-яких форм, що дозволяють мінімізувати енерговитрати при заданій граничній температурі і розмірних змінах з обмеженням по напругах і деформаціях в матеріалі;

- принципі безрозмірної оцінки якості функціонування технологічних систем з використанням комплексного параметра і часової моделі якості, яка дозволяє оцінювати величину напрацювання при будь-якій гарантії;

- типізації індукційних нагрівачів по галузях застосування і енергетично ефективному їх використовуванню для різних конструкцій;

- фізико-статистичної моделі надійності індуктора, що описує раптові і поступові відмови, побудованої на виявлених закономірностях дії руйнуючих чинників в часі;

- визначенні сфери застосування низькотемпературного нагріву в технологіях складання і розбирання.

Практична цінність роботи полягає у тому, що розроблено інженерну методику розрахунку оцінки якості технологічної системи по безрозмірному критерію, інженерну методику оцінки надійності індукційно-нагрівачого обладнання за малими обсягами випробування, індукційно-нагрівачого обладнання різних типорозмірів для складання та розбирання з'єднань з натягом, яке захищене свідоцтвами на винаходи та патентами, програмне забезпечення для проведення технологічної підготовки виробництва; впроваджено у виробництво важкого, енергетичного, транспортного машинобудування та судноремонту технологічні процеси та нагріваче обладнання, а в навчальний процес – нові теми при викладанні дисциплін «Технологія машинобудування» і «Якість та її забезпечення».

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення дисертації, винесені на захист, одержано здобувачем особисто. Постановка завдань і аналіз результатів досліджень виконані разом з науковим консультантом та частково зі співавторами публікацій.

Апробація результатів роботи. Матеріали дисертаційної роботи оприлюднювалися на конференціях і семінарах, зокрема, на Всесоюзному науково-технічному семінарі "Сборка-78" (м. Харків), Всесоюзній науково-технічній конференції "Повышение организационно-технического уровня сборочного производства на предприятиях "Минсельмаша" (м.Павлодар, 1984), науково-технічній конференції XIII (м.Харків, 1993), 15 и 16 Міжнародних

конференціях «Новые технологии в машиностроении» (с. Рибаче, 2005 і 2006), 12-ій Міжнародній науково-методичній конференції «Технологии XXI века» (м.Суми, 2005), Міжнародній науково-практичній конференції «Наука и технологии: шаг в будущее – 2006» (м.Белгород, 2006), на XV Міжнародному науковому семінарі «Высокие технологии в машиностроении» - «Интерпартнер» - 2005, 7-му Міжнародному науково-технічному семінарі «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте» (м.Свялява, 2007).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на наукових семінарах кафедр «Технологій та управління якістю в машинобудуванні» Української інженерно-педагогічної академії та «Технології машинобудування та верстатів» Національного технологічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 36 робіт, у тому числі 19 статей у фахових виданнях ВАК України, отримано 3 авторських свідоцтва на винаходи та промислові зразки, 2 патенти України.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації – 390 сторінок, в тому числі 324 сторінки основного тексту, 11 ілюстрацій на 10 сторінках, 94 ілюстрації за текстом, 6 таблиць на 6 сторінках, 16 таблиць за текстом. Список використаних літературних джерел складається із 238 найменувань на 20 сторінках, додатків - на 46 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність розглянутої проблеми. Сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи, визначено її наукову новизну та практичну цінність.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан проблеми підвищення якості та зниження енерговитрат у складально-розбиральних технологіях. Показано, що вирішення проблеми пов'язане з побудовою процесів та обладнання на основі загальності їх ознак уніфікації та забезпечення якості. На основі виконаного аналітичного огляду наявних робіт обґрунтовано напрям досліджень.

Недивлячись на очевидні переваги, пов'язані з підвищенням міцності і надійності з'єднань з натягом, спрощенням процесів їх складання і розбирання, обмежене застосування технологій, що використовують індукційний нагрів, пояснюється недостатньою розробкою питань структурної побудови ТП, енергозбереження і якості, а також непродуманістю технічних рішень при створенні технологічного оснащення. Не зважаючи на принципову схожість операцій нагріву деталей з'єднань для складання і розбирання, їх режими розраховуються з використанням різних методик. Питання відповідності

конструкції деталі, що нагрівається, і індуктора, що генерує в ній теплову енергію, розглядалися фрагментарно для окремих випадків. Наслідком неопрацьованості класифікації з'єднань по складності індукційного нагріву є відсутність автоматизованих систем проектування ТП складання і розбирання з'єднань.

Якість технології з нагрівом і отримуваних виробів розглядалися з точки зору досягнення заданих значень і розподілів температур по деталях. Основоположні дослідження підвищення несучої здатності з'єднань з натягом і збереження посадочних поверхонь деталей виконані Боровником Г.А. (1956р.), Андрєєвим Г.Я. (1958р.). Питання структурних перетворень в металі при термодії були в центрі уваги Зенкіна А.С. (1978р.). Група вчених займалася використанням неруйнуючого контролю міцності з'єднань: Решетов Д.Н. (1965р.), Корсаков В.С. (1971р.), Максак В.І. (1975р.), Арпентьєв Б.М., Зенкін А.С. (1985-1986р.), а перші дослідження точності положення деталей виконані Арпентьєвим Б.М. (1986 р.). Дослідження в області локалізації нагріву при складанні та розбиранні, втрат теплової енергії деталями в навколишнє середовище, переходу теплоти в охоплюючу деталь, раціональний просторовий розподіл теплової енергії проводили Корсаков В.С. (1961р.), Андрєєв Г.Я., (1962р.), Лактіонов Н.М. (1979р.), Арпентьєв Б.М. (1987р.), Куцин А.Н. (1999р.). Ці розробки можуть бути базою для досліджень якості виробів, отриманих при збиранні та розбиранні, і побудови енергозберігаючих технологій. Необхідно мати фізико-математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок теплової енергії, температурного і поля напруги в деталях, які дозволяють мінімізувати енерговитрати при забезпеченні якості ТП. Немає також часових моделей якості технологічних систем (ТС), що реалізують процеси складання і розбирання з'єднань з нагрівом.

Важливе місце належить надійності індукційно-нагрівальних установок (ІНУ), оскільки індуктор – це невідновлюваний об'єкт. Для індуктора розроблено модель надійності при поступових відмовах. Це не зовсім відповідає фізичним процесам, які протікають при періодичних включеннях ІНУ. Необхідною є адекватна модель надійності.

Таким чином, розв'язок існуючої науково-технічної проблеми складально-розбирального виробництва вимагає теоретичних і експериментальних досліджень для отримання принципових рішень по створенню технологій та устаткування.

У **другому розділі** розглянуто конструкції охоплюючих деталей і з'єднань з точки зору індукційного нагріву. Виконано теоретичні дослідження по визначенню можливої економії енергії при нагріванні ступінчастих вісесиметричних деталей з урахуванням напруги, що виникає. Запропоновано класифікацію складальних одиниць і охоплюючих деталей з'єднань.

Показано, що витрата енергії при індукційному нагріві може бути істотно знижена за рахунок його локальності. Наприклад, для деталей з конструкційної сталі, що мають маточину з диском, в залежності від розмірів і перепаду

температур між ними економія теплової енергії при обмеженнях по напрузі може змінюватися в межах від 2% до 27%. На рис.1 показано вимірювання величини економії енергії для деталі з відношенням посадочного діаметру d до діаметру маточини D_c - 1,5, діаметру диску до D_c - 1,8 і товщини диску h до довжини маточини 0,3.

Враховуючи, що складання з термодією підвищує міцність з'єднання з натягом у деталей, що мають маточину, необхідно завжди зменшувати її масу, що забезпечить зниження витрати теплової енергії.

На прикладі конструкції центра колеса тепловоза ТГМ - 40 (рис.2) було досліджено напружено-деформований стан (НДС) при локальному нагріві маточини. Побудовано модель, яка описує конструкцію центра колеса як пружну систему, що складається з кілець (рис.3) і оболонок лінійно-змінної товщини (рис.4). Кут нахилу оболонок α і її товщина h може мінятися. Модель дозволяє аналізувати вплив змін в конструкції і режимах нагріву на НДС.

Система рівнянь, які описують пружну деформацію твердого тіла, включає рівняння рівноваги $\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + X_j = 0; j = \overline{1,3}$; рівняння зв'язку між

деформаціями і переміщеннями (рівняння Коші): $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = \overline{1,3}$;

закон Гука з урахуванням температурних деформацій $\varepsilon(0)$:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0 \frac{3\nu}{1+\nu} \right) + \delta_{ij} \varepsilon^{(0)}; i, j = \overline{1,3}.$$

Тут $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненти тензорів напруги і деформацій; X_j - проекції на осі координат об'ємних сил, віднесені до одиниці об'єму; x_j - компоненти координати точки недеформованого тіла; u_i – проекції вектора переміщень точки тіла; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases}$ - символ Кронекера; $G = E/(2 + 2\nu)$ – модуль зрушення; $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ – середня нормальна напруга; $\varepsilon_0 = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)/3$ – середнє відносне подовження.

При цьому на частини поверхні тіла можуть бути задані граничні умови в напругах $X_{iv} = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} l_j; i = \overline{1,3}$ або в переміщеннях $u_i = g_i; i = \overline{1,3}$; де X_{iv} – компоненти поверхневих напруг; g_i – переміщень на поверхні; l_j – косинуси кутів між координатними вісями і нормаллю до площадки.

Тоді:

$$N_r = \frac{E}{r_N} [(u + d \cdot \theta) I_R - I_T] - \text{сила}; \quad M_r = \frac{E}{r_M} \left[\theta \cdot I_Z - \frac{N_r r_N d^1}{E} \right] - \text{МОМЕНТ}$$

$$\Delta T = T - T_0$$

$$\sigma_r = 0; \quad \sigma_\theta = \frac{1}{r} \left[\frac{N_r r_N}{I_R} + z \frac{M_r r_M}{I_Z} \right] + E \left[\frac{I_T}{r I_R} - \alpha \Delta T \right], \quad \sigma_e = \max[\sigma_{\theta/z = -h/2}; \sigma_{\theta/z = h/2}].$$

$$h = h_0 (1 - x); \quad x = l/l_0, \quad x = l_0/h_0 \cdot \text{ctg } \varphi.$$

Тут E - модуль пружності; де $\Delta T = T - T_0$, T - середня по елементу температура, що приймається рівною температурі в центрі ваги вісьового перетину.

$$N_l = \sum_{n=1}^4 C_n N_l^{(n)} + \sum_{k=1}^2 N_l^{(ek)}; \quad M_l = \sum_{n=1}^4 C_n M_l^{(n)} + \sum_{k=1}^2 M_l^{(ek)};$$

$$N_\theta = \sum_{n=1}^4 C_n N_\theta^{(n)} + \sum_{k=1}^2 N_\theta^{(ek)}; \quad M_\theta = \sum_{n=1}^4 C_n M_\theta^{(n)} + \sum_{k=1}^2 M_\theta^{(ek)};$$

$$w = \sum_{n=1}^4 C_n w^{(n)} + \sum_{k=1}^2 w^{(ek)} + C_5,$$

$N_l^{(n)}, N_\theta^{(n)}, M_l^{(n)}, M_\theta^{(n)}, w^{(n)}$ ($n = \overline{1,4}$) окремі розв'язки однорідних рівнянь, C_n ($n = \overline{1,4}$) - постійні інтеграції.

$$\xi = x \left(\frac{N_\theta - \nu N_l}{E h} + \varepsilon_T \right) l_0 \sin \varphi; \quad - \text{радіальне переміщення}$$

$$\zeta = -\frac{w}{\sin \varphi} + x \left(\frac{N_\theta - \nu N_l}{E h} + \varepsilon_T \right) l_0 \cos \varphi; \quad - \text{вісьове переміщення}$$

$$\theta = x l_0 \frac{12(M_\theta - \nu M_l)}{E h^3}. \quad - \text{кут повороту нормалі до серединної поверхні}$$

$$\xi = \frac{l_0 x \sin \varphi}{E h_0^2 (1-x)} \left[\sum_{n=1}^4 C_n h_0 (N_\theta^{(n)} - \nu N_l^{(n)}) + h_0 \sum_{n=1}^2 (N_\theta^{(en)} - \nu N_l^{(en)}) + E h_0^2 \varepsilon_T (1-x) \right];$$

$$\theta = \frac{12 l_0 x}{E h_0^3 (1-x)^3} \left[\sum_{n=1}^4 C_n (M_\theta^{(n)} - \nu M_l^{(n)}) + \sum_{n=1}^2 (M_\theta^{(en)} - \nu M_l^{(en)}) \right];$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_l \sigma_\theta}.$$

Було встановлено, що ма-ксимальні еквівалентні напруги σ_e , при тих же енерговитратах на локальний нагрів створюються в залежності від h при нахилі диску від 4° до 8° (рис.5).

Технологічна гнучкість виробництва і економічність визначаються уніфікацією ТП, яка базується на класифікації виробів і їх елементів. Розроблена класифікація характеризується ознаками, вказаними в табл.1. Класифікація дозволяє оцінювати ступінь складності ТП, а також вибрати тип індуктора.

**Характеристика специфікованої складальної одиниці і деталей, що в неї
входять**

№ п/п	Класифікаційні ознаки
1	Специфікована складальна одиниця або з'єднання
1.1	Розмірна характеристика - габаритні розміри
1.2	Маса складальної одиниці (з'єднання)
1.3	Характеристика з'єднання
1.4	Відносне розташування деталей
1.5	Складність складальної одиниці (дво- або багатоелементна)
1.6	Ступінь доступу до деталі, що нагрівається
2	Деталі, що входять в складальну одиницю або з'єднання
2.1	Розмірна характеристика - габаритні розміри (довжина або висота, діаметр або ширина)
2.2	Маса деталі
2.3	Форма охоплюючої деталі

У **третьому розділі** визначено галузі використання у складальному і ремонтному виробництві технологій запресовки та з нагрівом деталей, розроблено типові схеми ТП і уніфікованих операцій, запропоновано комплексний безрозмірний показник якості виробів.

Розглянувши найбільш поширені посадки з відхиленнями H7, H8 при p6, p6, r6, s6, n7, x7, z7 і N7, P7, R7, S7, N8, U8 при h6, h7, h8 з'єднань із сталі типу „втулка і суцільний вал”, побудовано номограму, яка дозволяє визначити галузі кращого застосування технологій складання запресовкою чи з використанням нагріву (рис. 6). Прийняті обмеження для запресовки - величина контактної тиску в посадці, що викликає задири поверхонь, в технології складання з нагрівом – це температура в 350°C, як гранична, як така, що не викликає змін фізико-механічних властивостей матеріалу.

Понизити енергоємність ТП можливо за рахунок збільшення інформаційного ресурсу. При ТП складання з використанням інформації про фактичну величину натягу в кожному з'єднанні зменшення енерговитрат на нагрів деталей, у порівнянні із традиційним складанням за максимальним натягом (N_{max}), може скласти до 35%, а при забезпеченні натягу близького до мінімального (N_{min}), внаслідок групування деталей, - до 50%, при приточуванні деталей на N_{min} - до 60%.

Запропоновано уніфікувати ТП складання або розбирання на основі уніфікації операцій по утворенню з'єднань або їх роз'єднання.

Уніфіковані операції за технологічними принципами такі: базування, розташування осі базової деталі, послідовність складання або розбирання, напрям

робочого руху, наявність або відсутність силової дії. Розроблено 4 схеми уніфікованих ТП складання і 3 – розбирання, що охоплюють роботу з дво- і багатоелементними складальними одиницями.

Для розрахунку циклів складання або розбирання багатоелементних складальних одиниць з використанням різної кількості складального і нагрівального устаткування, з використанням теорії множин отримано загальну формулу, що дозволяє визначити його мінімальну величину.

$$\tau(O_1 \cup O_2 \cup \dots \cup O_n) = \tau(O_1) + \tau(O_2) + \dots + \tau(O_n) - \{ \tau(O_1 O_2) + \tau(O_1 O_3) + \dots + \tau(O_{n-1} O_n) + \{ \tau(O_1 O_2 O_3) + \tau(O_1 O_2 O_4) + \dots + \tau(O_{n-2} O_{n-1} O_n) \} - \dots + (-1)_{n-1} \tau(O_1 O_2 \dots O_n), \quad (1)$$

Тут τ - час; n - число O операцій (включно з транспортними).

Цикли запропоновано зображати у вигляді кругових діаграм, з яких досить просто знаходити ККД устаткування та інші характеристики ТП.

Якість, отримувана при складанні або розбиранні виробів, розглядалась як забезпечення ТС заданих допусків різного роду контрольованих в часі параметрів. Оскільки для комплексної оцінки якості необхідно мати безрозмірні значення параметрів, запропоновано наступну залежність визначення в часі τ безрозмірного параметра $r_m(\tau)$

$$r_m(\tau) = (x_m(\tau) - x_{m.onm}) / (x_m^* - x_{m.onm}), \quad (2)$$

де x_m^* - допустима верхня межа m -ого параметра; $x_{m.onm}$ - оптимальне (номінальне) значення параметра x_m .

Величина $r_m(\tau)$ може приймати будь-які значення, але всі вони такі, що при виконанні нерівності $-1 < r_m(\tau) < 1$, процес в системі протікає якісно, а при значеннях $r_m(\tau) \geq 1$ або $r_m(\tau) \leq -1$ система дає збої по якості. Оскільки при будь-якому кінцевому τ величини $r_m(\tau)$ фізично обмежені як «зверху», так і «знизу», то безрозмірна величина $r_m(\tau)$ має нижній $r_{m.o}(\tau)$ і верхній пороги $r_{m.e}(\tau)$ значень $r_m(\tau)$, які є кінцевими. Причому завжди $r_{m.o}(\tau) < r_{m.e}(\tau)$. Тому моменти $\tau_{1,m}$ та $\tau_{2,m}$ відмови m -ого параметру системи за якістю визначається із розв'язку рівнянь

$$r_{m.o}(\tau_{1,m}) = -1 \text{ и } r_{m.e}(\tau_{2,m}) = 1,$$

а якість цього параметра за часом характеризується величиною

$$H_m = \min(\tau_{1,m}, \tau_{2,m}). \quad (3)$$

Звідси якість всієї системи за контрольованими параметрами

$$H = \min_{1 \leq m \leq N} \{ H_m \}. \quad (4)$$

Існування верхнього і нижнього порогів параметра r_m вимагає, щоб дійсна функція щільності $f_u(r)$ безрозмірного параметра мала вигляд

$$f_u(r) = (r - r_o)(r_o + r_k - r) \psi_u(r), \quad (5)$$

де r_o - нижній поріг параметра r ; $r_o + r_k$ - верхній поріг параметра r ; $\psi_u(r)$ - дійсна функція безрозмірного параметра.

Оскільки $f_u(r) > 0$ для будь-яких r , що належать $(r_o, r_o + r_k)$, то $\psi_u(r) > 0$ для будь-яких r , що належать $(r_o, r_o + r_k)$. Істинну функцію $\psi_u(r)$ неможливо знайти, тому вона прийнята у вигляді степеневі залежності, що експериментально

підтверджено великою кількістю досліджень за різними параметрами. Отримана функція розподілу параметра якості r має вигляд

$$F(r) = \begin{cases} 0 & , \text{при } r \leq r_0; \\ 1 - \frac{(r_k + r_0 - r)^{\alpha+1} (r_k + (1+\alpha)(r - r_0))}{r_k^{2+\alpha}} & , \text{при } r_0 \leq r \leq r_0 + r_k; \\ 1 & , \text{при } r > r_0 + r_k; \end{cases} \quad (6)$$

де α – параметр форми.

Математичне очікування і дисперсія випадкової величини R

$$M(R) = r_0 + \frac{2r_k}{\alpha+3} \quad \text{и} \quad D(R) = \frac{2(\alpha+1)r_k^2}{(\alpha+3)^2(\alpha+4)}. \quad (7)$$

Оцінки параметрів моделі визначаються з розв'язку системи

$$\begin{cases} \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)} = \mu_{1;3}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=2}^{n-1} (i-1)(n-i) r_{(i)} = \mu_{2;3}; \\ \frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=3}^n C_{i-1}^2 r_{(i)} = \mu_{3;3}, \end{cases} \quad (8)$$

де n - обсяг контрольної вибірки; C_{i-1}^2 - число поєднань з обсягу вибірки $n-i$ по 2 ; $\mu_{i;3}$ – математичне очікування i -ої порядкової статистики з обсягу виборки $n=3$.

$$\text{Оцінки параметрів (6):} \quad \hat{r}_k = \frac{2(2\alpha+5)(2\alpha+3)(\alpha+3) \left(\sum_{i=3}^n C_{i-1}^2 r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)} \right)}{3n(n-1)(n-2)(\alpha+1)(\alpha+2)},$$

(9)

$$\hat{r}_0 = \frac{6 \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}}{n(n-1)(n-2)} - \frac{2 \hat{r}_k (13\alpha^2 + 41\alpha + 32)}{(3\alpha+7)(3\alpha+5)(3\alpha+4)}, \quad (10)$$

де α знаходиться із розв'язку кубічного рівняння

$$\frac{\sum_{i=2}^{n-1} (i-1)(n-i) r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}}{\sum_{i=3}^n C_{i-1}^2 r_{(i)} - \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 r_{(i)}} = \frac{50\alpha^3 + 240\alpha^2 + 370\alpha + 180}{81\alpha^3 + 432\alpha^2 + 747\alpha + 420}. \quad (11)$$

Розроблена часова модель якості (6) з оцінками якості її контрольованих параметрів, дозволила запропонувати методику розрахунку ТС, яка гарантує якість виробів, що випускаються.

У **четвертому розділі** розглянуто теплові процеси при складанні та розбиранні з'єднань з індукційним нагрівом. Побудовано моделі теплового стану деталей і з'єднань, що дозволяють визначити температурні і часові режими, які забезпечують розширення необхідної величини і форми посадочної поверхні деталі, що нагрівається, і спрямованість її скріплення або роз'єднання з охоплюючою, а також розподіл потужності нагріву, при якій мінімізуються температурні напруги.

Для розрахунку нестационарних теплових полів запропоновано блочно-матричний апарат, заснований на розбивці деталей на блоки, в межах яких градієнт температур може бути прийнятий таким, що дорівнює нулю (наприклад, шар, що дорівнює глибині проникнення електромагнітного поля). Тоді матричний запис теплового стану для будь-якого кінцевого числа k блоків з урахуванням напрямку теплових потоків і нормалей поверхонь, через які вони проходять, а також граничних умов між ділянками у відповідності до закону Ньютона, має вигляд

$$C \cdot dT/d\tau = A \cdot T + \Delta W, \quad (12)$$

де C - матриця теплоємностей блоків; T - матриця векторів температур блоків; A - матриця теплових провідностей; W - вектор тепловиділення в блоках.

Розв'язок задачі визначення температур при неоднорідному індукційному нагріві для довільно заданих умов

$$T_{n+1} = e^{A\Delta\tau} T_n + (e^{A\Delta\tau} - E) A^{-1} C^{-1} W, \quad (13)$$

де $\Delta\tau = \tau_{n+1} - \tau_n$ - інтервал часу між T_{n+1} та T_n ; E - одинична матриця.

Температурний зв'язок двох сусідніх блоків визначається рядами, що сходяться

$$T_{n+1} = \left[E + A\Delta\tau + \dots + \frac{(A\Delta\tau)^n}{n!} \right] T_n + \left[\Delta\tau + \frac{A(\Delta\tau)^2}{2!} + \dots + \frac{A^{n-1}\Delta\tau^n}{n!} \right] C^{-1}\Delta W. \quad (14)$$

Така універсальна багатоконпонентна модель індукційного нагріву дозволяє вирішувати задачі оптимального управління нагрівом в просторі.

α_{13}

На рис. 7 представлено приклад трьохкомпонентної моделі з'єднання вал-облицювання (рис.8) суднового двигуна (є три зони накопичувача теплової енергії – 1,2,3). Модель дала можливість визначити необхідну потужність нагріву облицювання по зонах так, щоб скріплювання її з валом при складанні почалося з середини, а розкріплювання при розбиранні - з торців, що виключає небажану для зварних швів напругу.

Часова характеристика операцій скріплювання і розкріплювання деталей може бути визначена тільки при відомих значеннях теплової провідності (λ_{12}) контакту деталей площею S_H і тепловіддачі в навколишнє середовище від деталей (λ_1) та (λ_2). Розв'язок рівняння нестационарного теплообміну дозволило отримати рівняння теплової провідності зони контактування деталей

$$\lambda_{12} = \alpha_1 S_H [1 + K_1 (1 - \Delta T / \Delta T_H)] + \frac{2\alpha_2 S_H}{\beta D \Delta T_H - N} [1 + K_2 (1 - \Delta T / \Delta T_H)],$$

де α_1 , та α_2 - коефіцієнти конвективної теплопередачі і кондуктивної теплопровідності; β – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; K_1, K_2 - коефіцієнти зміни конвективного і кондуктивного теплоперенесення.

Деталі з маточинами дають можливість зменшувати енерговитрати за рахунок локалізації нагріву, але необхідно не перевищувати допустиму матеріалом напругу. Це досягається оптимальним розподілом температур. Прикладом деталі з маточиною є колісний центр колеса тепловоза ТГМ - 40 (рис.9). Стандартний процес складання коліс з віссю полягає у почерговій установці на вісь центрів коліс, а потім на них бандажів. Це технологічно складно із-за необхідності кантування крупногабаритної важкої колісної пари. Зручніше спочатку збирати колеса - центра з бандажами, а потім встановлювати їх на вісь. Проте звичайний нагрів газовими форсунками зібраного колеса під посадку на вісь знижує його якість, оскільки створює в дисковій частині пластичні деформації. Необхідно було перевірити ефективність складання з індукційним нагрівом.

Розрахункова кінцевоелементна модель колеса на основі тороїдальних кінцевих елементів (КЕ) включає систему рівнянь пружного деформованого твердого тіла:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \sigma_{ij} + X_j = 0; \quad j = \overline{1,3}; \quad - \text{рівняння рівноваги}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i, j = \overline{1,3}. \quad - \text{рівняння зв'язку деформацій і}$$

переміщень

При чисельному розв'язку використано принцип можливих переміщень. За максимальні напруги взяті еквівалентні. Для розрахунків створено програмний комплекс МКЕ-D, на мові Fortran Microsoft.

На рис.10, 11 і 12 представлено результати розрахунків. При розширенні посадочного отвору до 0,239 мм при 6 хв нагрівом, максимальній температурі в 300°C витрати енергії склали 22,86 мДж. Як видно, пластичні деформації в матеріалі центра колеса при такому режимі нагрівання виключені.

Таким чином, технологія складання колісної пари, коли спочатку формують колесо - одягають на центр бандаж, а потім колеса встановлюють на вісь при індукційному нагрівання - реалізувати можливо.

Нагрівання невісесиметричної плоскої деталі для вилучення з неї валу – найбільш складна технологічна задача, внаслідок різної інтенсивності тепловідводу по координатних вісях (рис.13). Задача вирішувалася для з'єднання балансира з торсіоном, що використовується в ходовій частині гусеничної машини в постановці: забезпечити задане розширення отвору при мінімумі кількості тепла (локальний нагрів) з обмеженнями по напругах і температурах. Розроблено кінцево-елементну модель в загальній постановці - визначення температурного поля пластини, що забезпечує рівномірне розширення несиметричного розташованого в ній отвору. В моделі використовувався комплексний метод М. Бокса. Метод КЕ

використовувався у формі переміщень, коли КЕ мали трикутні поперечні перетини з трьома вузлами. Застосовано метод Кранка-Ніколсона, за яким обчислюються похідні за часом від вектора температур. Розподіл потужності показано на рис.14.

Виконані розрахунки з використанням розробленого комплексу МКЕ - D по варіантах розподілу потужності по поверхні балансира показали, що необхідне рівномірне розширення посадочного отвору 0,2 мм досягається за 3 хв при максимальній температурі 350°C, витратах енергії 1,972 мДж і потужності нагріву 674 кВт/м².

Такий розподіл потужності по поверхні балансира можливо створити індуктором, хоча він при цьому буде складної форми.

У **п'ятому розділі** розглянуто схеми індукційного нагріву і типи індукторів, визначені вимоги до них. Розроблено принципи вибору типу, потужності, геометричних параметрів індуктора для створення в деталі, що нагрівається, теплових потоків, які формують задане температурне поле. Проведено типізацію індукційних нагрівачів та систем їх управління. Побудовано модель і розроблено методику оцінки надійності індукційних нагрівачів.

Різні типи індукторів, що є головною частиною ІНУ, не однаково передають і розподіляють електромагнітну енергію, отже, створюють температурне поле в деталі. На рис.15 і 16 представлені їх типові схеми. Окрім схем рис. 16 а) і б) всі вони можуть використовуватися для нагрівання під складання або розбирання.

На підставі аналізу існуючих і можливих варіантів конструкцій індукторів проведено їх конструкторсько-технологічну типізацію за ознаками розташування індукційних котушок, їх кількості, наявності магнітної системи і конструкції індукційної котушки (одно- або багатовиткова). Типізація дозволяє вибрати індуктор для деталі або з'єднання з їх класифікацій.

При швидкісному індукцій-ному нагріванні виникають температурні градієнти в матеріалі деталі. В деяких випадках їх величини обмежуються технічними вимогами. Для нагрівання під складання запропоновано нову схему нагріву (рис.17), при якій генерування теплоти в деталі відбувається по зовнішній і внутрішній поверхнях.

Технічний рівень ІНУ характеризується тепловим і електричним ККД, значенням $\cos \varphi$ - відношення активної потужності (W_a) індуктора до повної (W_n), спожитої з мережі, мінімумом втрат джоулів і надійною роботою. Найефективніше регулювати його роботу можна зміною струму в індукторі. На підставі даних про необхідний тепловий стан деталі з використанням функції Гамільтона отримано рівняння за визначенням сили струму в індукторі (I), при якому для даної напруги буде мінімум втрат. Для компенсації реактивної потужності (різниця $W_n - W_a$) пропонується використовувати частотно-імпульсне управління. Його суттю є

введення в канал управління негативного зворотного зв'язку по I, що дозволяє компенсувати його зменшення в процесі нагрівання шляхом деякого збільшення живильної напруги, початкові значення якої встановлюються дещо нижчими ніж номінальні.

Індуктори належать до невідновлюваних виробів, тому основним показником надійності у них є безвідмовність при використанні. Причиною відмови індуктора є коротке замикання між витками котушки внаслідок електричного пробоя ізоляційного шару елементарної площадки ΔS із-за теплових і механічних дій, зокрема, вібрацій. Особливо небезпечні пікові навантаження, які виникають при вмиканні індуктора. Тому, очевидно, що функція надійності індуктора $l(\tau)$ повинна визначатися шляхом двох видів відмов - раптових і поступових, з відповідними функціями надійності $l_1(\tau)$ и $l_2(\tau)$. Так як кожна з цих відмов може наступити незалежно одна від одної, то

$$l(\tau) = l_1(\tau)l_2(\tau). \quad (15)$$

Площадка ΔS має обмежену міцність $R(\tau)$, і відмова індуктора настає в перший момент перевищення навантаженням $S(\tau)$ цієї міцності - $S(\tau) > R(\tau)$. Процес зміни навантаження при раптовій відмові має асимптотичну незалежність і стаціонарність, тому час τ першого перевищення рівня міцності ΔS матиме експоненціальний розподіл з функцією надійності

$$l_1(\tau) = \exp(-\lambda\tau), \quad \tau \geq 0, \quad (16)$$

де для індуктора параметр $\lambda = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^r v_j N_i \lambda_i$ є сумарна інтенсивність відмов по пробоях площадок ΔS ; k - загальна кількість шарів ізоляції мінус одиниця; r - число витків струмопроводників в одному шарі; v_j - число шарів j -го типу; N_i - число площадок ΔS - в одному витку i -го типу; λ_i - інтенсивність відмов по площадці ΔS на витку i -го типу.

Міцність ΔS убуває з часом, і це є детермінованою випадковою функцією, $R(\tau)$, а навантаження $S(\tau)$ має стаціонарний характер і моделюється випадковою дискретною послідовністю імпульсів нульової ширини (рис.18). Тому функція надійності для поступових відмов ΔS_i .

$$l_{2i}(\tau) = \exp\left(-\int_0^{\tau} h(x) \bar{\psi}(R(x)) dx\right), \quad (17)$$

де $\bar{\psi} = 1 - \psi(\tau)$, $\psi(\tau)$ - функція розподілу амплітуд імпульсів навантаження; $h(\tau)$ - частота навантаження.

Дослідження показали, що функція розподілу амплітуд імпульсів може бути описана розподілом Вейбулла, а їх середня частота $h(\tau)$ практично дорівнює константі h .

$$\psi(\tau) = 1 - \exp(-(\tau / \beta)^{1/\alpha}).$$

Тут β - масштабний параметр; α - параметр форми.

Вважаючи, що міцність ΔS убуває за залежністю $R(\tau) = R(0)(1 - B\tau)^\alpha$, де $R(0)$ - початкова міцність, а B - параметр убування, α - параметр форми, отримуємо на підставі (17)

$$l_{2i}(\tau) = \exp\left(-\frac{a}{b}(\exp(b\tau) - 1)\right),$$

де параметри a и b фізично розшифровані: $a = h \exp(-(R(0)/\beta)^{1/\alpha})$; $b = B(R(0)/\beta)^{1/\alpha}$ де $1/B$ - час старіння ізоляції за відсутності імпульсного навантаження.

Оскільки відмови по елементарних площадках ΔS взаємно незалежні, а відмова будь-якої площадки ΔS_i розглядається як відмова індуктора, то маємо модель відмови ланцюга, де τ - час безвідмовної роботи індуктора визначається з часу роботи кожної площадки як $\tau = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$, де n число площадок ΔS .

Число n достатньо велике, і всі функції розподілу $F_i(\tau) = 1 - l_{2i}(\tau)$ такі, що при розкладанні їх в степеневий ряд по τ має місце при $\tau \rightarrow 0$ рівність

$$F_i(\tau) = g \tau^\gamma + o(\tau^\gamma),$$

де $g > 0$, $\gamma > 0$, 0 - нескінченно мале.

Звідси витікає, що функція надійності при поступових відмовах з піковими навантаженнями апроксимується виразом вигляду

$$l_2(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau^\gamma}{\beta}\right) \quad (18)$$

де $\beta = 1/gn$.

Тоді, з (15), (16) і (18) маємо модель надійності індуктора

$$l(\tau) = \exp\left(-\left(\frac{\tau^\gamma}{\beta} + \lambda\tau\right)\right). \quad (19)$$

На рис.19 представлені функції надійності $l_1(\tau)$, $l_2(\tau)$ та $l(\tau)$ для $\lambda = 0,2$, $\gamma = 1,5$ та $\beta = 10$.

Розрахунки виконані за розробленою програмою в Mapl 9.5.

Для моделі (19) методом максимальної правдоподібності знайдено оцінки параметрів γ , σ та λ , що дозволило за результатами невеликої кількості випробувань (7-10) зробити оцінки надійності ІНУ у будь-який момент часу.

Оцінку гамма-процентного ресурсу ІНУ при заданому ризику ε і знайдених оцінках параметрів γ , σ та λ визначають із розв'язку рівняння (20) відносно τ .

$$\frac{\tau^\gamma}{\beta} + \lambda\tau = \ln \frac{1}{1 - \varepsilon}. \quad (20)$$

У **шостому розділі** представлено експериментальні дослідження, виконані в лабораторних умовах і на підприємствах різних галузей промисловості при відладці впроваджуваних ТП і устаткування.

Роботи виконувалися за методикою, яка передбачає всі стадії експерименту, починаючи від вибору матеріалу зразків, натурних деталей і з'єднань до

устаткування, приладів і інструментів. Як прилади, які реєструють температуру, використовувалися електронні потенціометри КСП - 4, а деформацій – СИИТ-3. Нагрівальними пристроями були експериментальні індуктори або промислові ІНУ. При дослідженнях НДС при нагріванні використовувалися високотемпературні приварювані фольгові тензорезистори НПМ - 430 з базою 10 мм, опором 98-101 Ом і коефіцієнтом тензочутливості 1,97.

Експерименти по нагріванню та складанню проводилися з шарикопідшипниками №115, 220 і 326, зубчатими втулками, напівмуфтами і гальмівними шківками мостових кранів з діаметром посадки від 40 мм до 135мм, колесом з віссю тепловозу ТГМ - 40. Для розбирання використовувалися з'єднання балансир з торсіоном і «валом в зборі» планетарної бортової передачі гусеничної машини. Для процесів складання та розбирання - бронзове облицювання із сталевим валом суднового двигуна середнього риболовецького траулера (СРТ-М) з посадкою 182Н9/т6, зовнішнім діаметром облицювання 210мм, завдовжки - 760 мм при довжині валу 2300мм.

В результаті експериментальних досліджень встановлено раціональне співвідношення між розміром зовнішньої поверхні деталі, що нагрівається, і площею опорного магнітопровідника для індукторів за схемою рис.16 а) і б), при якому його $\cos \varphi$, який можна визначити як енергетичний ККД, буде максимальним, а також конструкцію пірамідального магнітопровідника, що дозволяє здійснювати випереджаючий нагрів внутрішніх кілець незалежно від розміру підшипника.

Нагрівання гладкої циліндричної втулки із сталі 45, масою 5,3 кг в запропонованому комбінованому типі індуктора (схема рис.17) потужністю 9,7 кВт показало хороші результати: при високій швидкості нагріву - 250°C за 2 хв - температурний градієнт між зовнішньою і внутрішньою поверхнями склав всього 10°C на товщині 25 мм.

Експерименти з колесом тепловозу ТГМ-40 включали досліди по його нагріванню під посадку на вісь, збирання з віссю і визначення НДС матеріалу у порівнянні з даними по запресовці, які отримані в результаті досліджень ЦНДІ МШС. На рис. 20 представлено розподіл температур в колесі (усереднені дані) в процесі його нагрівання протягом 6 хв в індукторі (за схемою рис.15 б), під посадку на вісь, і подальше охолодження протягом 44 хв (включаючи процес складання).

Максимальні радіальна і окружна нормальна напруги в колесі при його нагріванні представлено в табл.2, а розпо-діли - на рис.21 і рис.22.

Таблиця 2

Максимальна напруга в колесі тепловоза у різні

моменти нагрівання і після збирання колісної пари, МПа

Операція	Час, хв.	R _H = 0,193 м		R _B = 0,335 м	
		σ _R	σ _Θ	σ _R	σ _Θ
Нагрівання	3	-322	-132	-333	-175
маточини під	6	-317	-120	-337	-170
посадку на вісь	-	-314	-115	-310	-235

Порівняння розрахункових (МКЕ - D) і експериментальних даних (тензометрія) показав їх збіг в межах 20%.

Нагрів балансирів з розточеними отворами діаметром 70 мм, у виготовленому у відповідності з теоретичними розрахунками розподілу потужності по балансиру, індуктором (рис.15 г) показав, що розширення отворів величиною 0,31-0,35 мм практично рівномірно в осьовому і радіальному напрямках. Час нагріву від 2 хв 30с до 2 хв 45с, що відрізняється від теоретично визначених значень на 24%, дає задовільний результат.

Експерименти по нагріванню під складання і розбирання облицювань гребних валів суднових механізмів виконувалися з використанням дослідно-промислового зразка індуктора, який було виготовлено згідно з розрахунком теплового стану облицювання за трьохмасовою моделлю (рис. 23).

Як видно, його котушка 1 виготовлена з нерівномірним розташуванням витків, і її обхоплює магнітопровідна система 2. Це дозволило отримати розрахункове температурне поле, змінне по довжині облицювання, що забезпечило його скріплення з валом середньою частиною, яку було нагріто до 130°C, тоді як кінці - до 145°C. Такий розподіл температур забезпечив отримання якісного з'єднання, оскільки було виключено розтягуючу напругу. Цей же індуктор було випробувано для нагрівання під розбирання і отримано хороші результати. Час нагрівання під складання склав 7 хв, а при розбиранні - 9 хв. Час скріплення облицювання з валом – 5хв. Потужність індуктора - 44 кВт.

У **сьомому розділі** представлено результати промислового використання технологій і устаткування, методики розрахунку їх економічної ефективності, технологічні принципи створення індукційно-нагрівального устаткування, а також розглянуто напрямки розвитку цього виду техніки.

Описано напівавтоматичну ІНУ для нагрівання деталей типу шків, напівмуфта, зубчате колесо під складання (рис.24), установку для розбирання з'єднань валу бортової планетарної передачі (рис.25) і балансира з торсіоном гусеничної машини (рис.26), напівавтоматичну установку для нагрівання та збирання елементів колісних пар локомотивів, індукційно-нагрівальну установку для складання і розбирання облицювання з валом суднового двигуна СРТ-М.

Запроваджені технологія та обладнання дали можливість в залежності від конструкції та габаритів деталей і з'єднань знизити енергозатрати та підвищити якість функціонування технологічних процесів.

Економічна ефективність впроваджених робіт за період з 1975 по 1990р.р. з урахуванням дольової участі складає більше 1,5 млн.крб., а з 2004 по 2005р. - 32 тис.грн.

ВИСНОВКИ

Розв'язано наукову проблему забезпечення якості і енергозбереження в технологіях складання і розбирання з'єднань з натягом при використанні індукційного нагріву, яка актуальна для важкого, енергетичного, транспортного машинобудування, суднобудування і судноремонту, гірського машинобудування. Запропоновані принципові технологічні і технічні рішення є загальними для складального та ремонтного виробництв, що забезпечить проектування ефективних технологій на основі уніфікації, а також економічне індукційно-нагрівальне устаткування на основі типізації.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Якісне складання з'єднань з натягом визначається для запресування величиною контактного тиску, а при використанні термодії – температурою та її розподілом. За запропонованою номограмою можна вибрати якнайкращий варіант технології залежно від характеристики з'єднань.

2. Інформаційне забезпечення технології дає змогу знизити рівень витрат теплової енергії: збирання по дійсному натягу - до 35% від нагріву під максимальний натяг; селективне збирання по натягу, близькому до мінімального - до 50% і збирання з приточуванням деталей на мінімальний натяг - до 60%.

3. Локальний індукційний нагрів зони отвору деталі, що конструктивно є маточиною з диском або маточиною з диском і ободом, дозволяє заощадити теплову енергію до 25% від повного нагріву деталі. Найбільші напруги в матеріалі деталі з диском і ободом виникають при кутах нахилу диску 4-8 градусів.

4. Запропоновані систематизація виробів та з'єднання з натягом деталей, типізація індукційних нагрівачів дозволили на загальній основі уніфікувати технології для процесів збирання і розбирання з використанням однотипного устаткування.

5. Якість процесів збирання і розбирання в часі можна оцінювати за якістю технологічної системи, що їх реалізує, використовуючи комплексний безрозмірний параметр, що є сукупністю різнорідних параметрів. Це дає

можливість оцінити будь-яку гарантію величини напрацювання до повної відмови технологічної системи.

6. Розроблені фізико-математичні моделі, що описують неоднорідні нестационарні теплові процеси низькотемпературного індукційного нагріву деталей і теплообміну в з'єднаннях, дозволяють визначати:

- необхідну питому потужність нагріву і її розподіл по поверхні вісесиметричної деталі залежно від необхідної форми розширення її посадочної поверхні;

- час скріплювання або розкріплювання деталей в з'єднаннях з похибкою до 10%, необхідний для розрахунку циклів збирання або розбирання;

- режим локального нагріву складнопрофільної вісесиметричної складальної одиниці типу обандажене колесо залізничного транспорту, що забезпечує якість по гранично-допустимій температурі і напругах в матеріалі;

- режим локального нагріву невісесиметричних з'єднань з охоплюючою деталлю плоскої конструкції типу «балансир з торсіоном гусеничної машини», що забезпечує отримання рівномірного розширення посадочного отвору, із збереженням якості по допустимих температурах і напругах в матеріалі.

7. Виконана типізація індукційних нагрівачів за сферами застосування - збирання, розбирання або збирання і розбирання, конструкціями деталей, а також запропоноване до використання їх керування по струму дозволяє виконувати нагрівання з високим коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi$ до 0,6 - 0,7), що зменшує витрату електричної енергії.

8. Розроблена фізико-статистична модель надійності багатовиткового індуктора, яка фізично адекватна до процесів, що протікають в ньому при нагріванні деталей, дозволяє оцінювати гамма-процентний ресурс при малому обсязі контрольних випробувань ($n \leq 10$).

9. Проведені дослідження дали змогу висунути і сформулювати ряд нових наукових положень:

- безрозмірної оцінки функціонування технологічних систем в часі;
- оцінки надійності індукторів, що враховує як раптові, так і поступові відмови.

10. Результати досліджень, що мають прикладний характер, впроваджено у виробництво в період з 1973-2006р.р. на судноремонтних заводах, тепловозоремонтних заводах, заводах важкого машинобудування, підприємствах Куби (за контрактом Енергомашекспорту СРСР). Це дало можливість в залежності від конструкції та габаритів деталей і з'єднань знизити енергозатрати від 10% до 25%. Якість функціонування технологічних процесів в часі підвищується на 15% - 20%.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андреев Г.Я., Кушаков В.И., Резниченко Н.К. Универсальный полуавтомат сборки соединений диск-вал.// Механизация и автоматизация производства. –М.-

1975.- №9. -С. 6-7.

2. Резниченко Н.К., Тимошенко С.Н., Тарасов П.А. Полуавтоматическая многоэлементная сборка крупногабаритных деталей. // Материалы всесоюзного научно-технического семинара "Сборка-78". - Харьков. -1978. -С. 17-19.

3. Лыткина Н.К., Кушаков В.И., Резниченко Н.К. Прочность бесшпоночных соединений барабанов ленточных конвейеров при тепловой сборке. // Проблемы прочности. - К. - 1979.-№4. -С.73-76.

4. Лыткина Н.К., Кушаков В.И., Резниченко Н.К. Напряженно-деформированное состояние втулки подшипника скольжения при тепловой сборке и эксплуатации. // Детали машин. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - М.- 1980.- №30. -С. 96-102.

5. Любов В. А., Святуха А.А., Кравцов М.К., Резниченко Н.К. Тепловая сборка и разборка крупногабаритных деталей кольцевой формы. // Всесоюзный научно-технический семинар "Повышение организационно-технического уровня сборочного производства на предприятиях "Минсельмаша". - Павлодар. - 1984.- С.5-7.

6. Резниченко Н.К., Романов В.А., Куценко А. И., Добровенский Ю.М., Софиенко В.Д. Станок для тепловой сборки. // Механизация и автоматизация производства. -М. -1988.-№7. С.18-19.

7. Святуха А.А., Каюн Г.Г., Кравцов М.К., Андрущенко И.П., Резниченко Н.К. Съёмник индукционный. Свидетельство на промышленный образец № 26206 от 15.09.88.

8. Резниченко Н.К., Романов В.А., Куценко А.И., Добровенский Ю.М., Софиенко В.Д. Механизированная разборка соединений колец подшипников с осями колесных пар. // Механизация и автоматизация производства. -М. -1990.- №3. - С.7-8.

9. Святуха А. А., Кравцов М.К., Любов В.А., Резниченко Н.К., Хмара А.Л. Механизация разборки подшипниковых колец и лабиринтовых уплотнений осей колесных пар тепловозов. // Механизация и автоматизация производства. -М. - 1990.- №12. С.18-19.

10. Кравцов М.К., Любов В.А., Резниченко Н.К., Святуха А. А. Станок для тепловой разборки прессовых соединений. Свидетельство на промышленный образец №29016. -1989.

11. Резниченко Н.К., Святуха А. А., Любов В.А., Кравцов М.К. Установка для тепловой разборки прессовых соединений. А.С.-№ 1556861. -1989.

12. Лыткина Н.К., Резниченко Н.К. Полуавтомат для тепловой сборки соединений "вал-ступица" ленточных конвейеров. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ХИПИ. Харьков. - 1993.- С.20-21.

13. М.К. Кравцов, Н.К. Резниченко, А.А. Святуха, В.В. Чернов. О влиянии прочностных характеристик промежуточных сред на несущую способность соединений с натягом собранных тепловым способом. // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. Збірник наукових праць КНУТД. –Київ: КНУТД. -2003. -№13. -С. 203-210.

14. М.К. Кравцов, Н.К. Резниченко, А.А. Святуха. Определение прочности характеристик промежуточного слоя в неподвижных соединениях, собранных технологий с нагревом. // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. Збірник наукових праць КНУТД. -Київ: КНУТД. -2004. -№39. -С.77-85.

15. Андреев А.Г., Резниченко Н.К. Напряженно-деформированное состояние составных осесимметричных конструкций, собираемых с натягом при использовании нагрева. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ «ХПІ». -2005.-№47. -С. 3-8.

16. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К. Применение технологии сборки соединений с натягом в машиностроительном производстве. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". -Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. - №43 – С.52-55.

17. Дука А.К., Резниченко Н.К. Нелинейная модель теплового режима сборки и разборки соединений с натягом.// Вісник Національного технічного університету "ХПІ". -Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. - №23– С. 89-95.

18. Резниченко Н.К., Созонов Ю.И. Надежность многовитковых индукторов. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". -Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. - №39 – С. 22-29.

19. Резниченко Н.К. Энергоинформационные технологии в сборочном производстве. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". -Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. - №9 – С. 43-48.

20. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К., Созонов Ю.И. Надежность изделий при случайных пиковых нагрузках. // Тезисы доклада 15 международной конференции «Новые технологии в машиностроении» 3-8 сентября. -Рыбачье. -2005. –С.56-58.

21. Лагода А.Н., Резниченко Н.К., Арпентьев Б.М. Индукторы для нагрева деталей под сборку и разборку. // Технологии XXI века 12-я международная научно-методическая конференция , тезисы доклада. – Сумы: СНАУ. -2005. –С.23.

22. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К., Созонов Ю.И. Надежность изделий при случайных пиковых нагрузках. //Вісті АІНУ. Машинобудування і прогресивні технології. -2005. -№ 3(26). -С. 71-74.

23. Клочко В.А., Дука А.К., Резниченко Н.К. Нелинейная физико-математическая модель сборки соединений с натягом при использовании нагрева. // Вісник науки і техніки. Харків: НТУ «ХПІ» - 2005. -№4(23) – С.28-37.

24. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К., Дука А.К. Спосіб визначення теплової

провідності контакту з'єднань з натягом. // Деклараційний патент на корисну модель №10972 від 15.12.05р. бюл. №12.

25. Маркин А.М., Резниченко Н.К. К вопросу о надежности невосстанавливаемых объектов // Довговічність, надійність, працездатність деталей рухомого складу залізниць та спеціальної залізничної техніки. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –Харків: УкрДАЗТ. -2005. -С. 189-196.

26. Лагода А.Н., Резниченко Н.К. Индукторы для нагріву деталей під складання і розбирання в механоскладальному виробництві та їх класифікація. // Вісник Сумського національного аграрного університету. -Суми: СНАУ. -2006. - №9(15). –С148-154.

27. Дука А.К., Резниченко Н.К. Индукционный нагрев деталей технологических соединений асимметричным электромагнитным полем. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХПІ».– 2006. - № 24. – С.84-91.

28. Резниченко Н.К. Безразмерный комплексный параметр качества технологической системы // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць .-Харків: НТУ «ХПІ».- 2006. – Вип.1 (12) – С.417-423.

29. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К. Оцінка надійності виробів по малій кількості випробувань. // Вісті АІНУ. Машинобудування і прогресивні технології. - 2006. -№3(30).-С. 82-88.

30. Резниченко Н.К. Разборка соединений колесно-гусеничных машин с применением индукционного нагрева // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – Харків. -2006. - №3/2(21). - С.90-93.

31. А.Г.Андреев, Н.К. Резниченко, О.В. Щепкин. Оптимизация нагрева при разборки деталей. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- Харків: НТУ «ХПІ». - 2006. - №32 – С. 3-8.

32. Арпентьев Б.М., Добровенський Ю.М., Куценко А.І., Резниченко М.К., Романов С.В. Пристрій для збирання і розбирання пресових з'єднань деталей складної форми. // Деклараційний патент на корисну модель №14652 від 15.05.06р. бюл. №5.

33. Резниченко Н.К., Дука А.К. Качество сборки соединений с натягом при использовании нагрева. // Сборка в машиностроении, приборостроении. -М.: Машиностроение. -2005. - №8. -С. 34-38.

34. М.К. Кравцов, Н.К.Резниченко , А.А. Святуха. Вплив деяких видів покриттів на міцність нерухомих з'єднань, складених тепловим способом.// Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції «Наука и технологии: шаг в будущее – 2006». Белгород: Роснаучкнига. -2006. -С.20-22.

35. Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К. Параметрические показатели качества изделий. //Современные проблемы подготовки производства, заготовительного

производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 7-го Международного научно-технического семинара. г. Свальява. – Киев: АТМ Украины, -2007. – С.5-9.

36. Дука А.К., Резниченко Н.К. Оптимизация индукционного нагрева изделий в механосборочном производстве. // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-технический сборник. Харків: НТУ «ХП». - 2007. - № 72. – С.136-143.

В работах 1 - 12, 30, 32 здобувачем запропоновано технологію збирання індукційно-тепловим методом з'єднань та принципове рішення з конструкції напівавтоматів, верстатів, пристроїв та технологічні принципи проектування обладнання; схеми багатоелементних та габаритних деталей з'єднань при складанні та розбиранні; розроблено теоретичний метод оцінки міцності безшпоночних з'єднань та метод розрахунку змін внутрішнього діаметру втулки підшипника ковзання при тепловому складанні; розроблено технологію знімання підшипників кілець з вісей колісних пар та з'єднання колісно-гусеничних машин.

В работах 13 – 16, 31, 34 запропоновано методику розрахунку міцнісних характеристик нерухомих з'єднань, які складені індукційно-тепловим методом, моделі напружено-деформованого стану вісесиметричних складальних конструкцій та плоскої пластини з несиметрично розташованими отворами при нагріванні для складання та розбирання, рекомендації по забезпеченню якості посадок з натягом в залежності від величини натягу та діаметру з'єднання; методику розрахунку характеристик статичної міцності, з'єднань з покриттям.

В работах 17, 23, 24, 33 запропоновано фізико-математичну модель теплового стану з'єднань з натягом, що враховує нестационарні теплові процеси; розрахункові залежності для визначення складових теплопередачі в проміжному шарі нерухомого з'єднання; трьохмасову модель термодинамічного стану з'єднань, яка дозволяє розрахувати розподіл температур деталі перед складанням.

В работах 19, 36 запропоновано принципіві технологічні рішення по енергозбереженню при складанні з'єднань з нагрівом та розбиранні з'єднань з індукційним нагрівом.

В работах 18, 20, 25 запропоновано модель оцінки надійності індуктора на основі трьохпараметричного розподілу Вейбула з урахуванням постійних та пікових навантажень, методику розрахунку гама-процентного ресурсу виробу.

В работах 21, 26 запропоновано принципи типізації індукторів та загальний підхід індукційного нагріву деталей симетричними та асиметричними електромагнітними полями.

АНОТАЦІЯ

Резниченко М.К. Технологічні основи забезпечення якості та

енергозбереження в процесах складання та розбирання з індукційним нагрівом.
– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.02.08 – технологія машинобудування. Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2007.

В дисертації вирішено актуальну науково-прикладну проблему сучасного машинобудування, що полягає у необхідності зниження енерговитрат та підвищення якості технологій складання та розбирання нероз’єднаних з’єднань з використанням індукційного нагрівання деталей складальних одиниць різного призначення.

Визначені галузі застосування низькотемпературного нагрівання в технологіях складання та розбирання, систематизовані конструкції з’єднань за ознакою складності використання індукційного термовпливу, а також дані рекомендації по конструюванню ступінчастих вісесиметричних деталей, які підлягають локальному нагріванню. Встановлені загальні принципи уніфікації технологій з операціями складання та розбирання дво- та багатоеlementних складальних одиниць.

Розглядання з’єднань як багато-компонентної системи з нестационарним теплообміном між деталями дозволили виявити закономірності дискретного індукційного нагрівання, які забезпечують якість виробу.

Розроблені моделі оптимізації розподілу потужності джерела тепла по поверхнях деталей різних форм, які дозволяють мінімізувати енерговитрати при заданій граничній температурі та обмеженнях по напрузі та деформаціях в матеріалі.

Запропоновано принцип безрозмірної оцінки функціонування технологічних систем з побудовою часової моделі якості.

Типізовані індукційні нагрівачі по функціональному призначенню, за енергетичною ефективністю їх використання в залежності від конструкції з’єднань та деталей, що нагріваються.

Встановлені закономірності дії на індуктор руйнуючих факторів та часу роботи, що дозволило побудувати фізико-статистичну модель надійності, яка описує раптові та поступові відмови.

Ключові слова: технологія складання та розбирання, якість технологічних процесів, енергозбереження, індукційний нагрів.

АННОТАЦІЯ

Резниченко Н.К. Технологические основы обеспечения качества и энергосбережения в процессах сборки и разборки с индукционным нагревом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2007.

В диссертации решена актуальная научно-прикладная проблема современного машиностроения, состоящая в необходимости уменьшения энергозатрат и повышение качества технологий сборки и разборки с использованием нагрева деталей сборочных единиц различного назначения.

На основе анализа процессов сборочно-разборочного производства соединений с натягом и технологий сборки и разборки с индукционным нагревом научно обоснованы принципы создания технологий и индукционного оборудования для низкотемпературного нагрева деталей, обеспечивающие высокое качество при энергосбережении.

Предложенные принципиальные технологические и технические решения являются общими для сборочного и ремонтного производств, что позволяет проектировать эффективные технологии на основе унификации и экономического индукционно-нагревательного оборудования на основе типизации.

Полученные новые теоретические и экспериментальные данные позволили установить:

- технологии сборки с нагревом определяются допустимой для материала деталей температурой, а технология сборки запрессовкой – контактным давлением в зоне сопряжения деталей. По предложенной номограмме можно выбрать наилучший вариант технологии в зависимости от характеристики соединений;

- локальный индукционный нагрев зоны отверстия детали типа ступица с диском или ступица с диском и ободом, позволяет сэкономить тепловую энергию до 25% от полного нагрева детали. Наибольшие напряжения в материале детали с диском и ободом возникают при углах наклона диска 4-8 градусов;

- информационное сопровождение позволяет снизить затраты тепловой энергии при сборке по действительному натягу – до 35% от применяемого нагрева по максимальному натягу, селективной сборке по натягу, близкому к минимальному – до 50% и сборке с приточкой деталей на минимальный натяг – до 60%;

- структурную схожесть технологий процессов сборки и разборки, поскольку в их основе лежит предложенная систематизация изделий и нагреваемых деталей, и общность операций нагрева, что позволяет использовать однотипное оборудование;

- качество процессов сборки и разборки во времени можно оценивать по качеству технологической системы, используя комплексный безразмерный параметр, являющийся совокупностью разнородных параметров **это** дает возможность оценить любую гарантию величины её наработки до отказа.

Разработаны физико-математические модели, описывающие неоднородные нестационарные тепловые процессы низкотемпературного индукционного нагрева деталей и теплообмена в соединениях, позволяющие определять:

- необходимую удельную мощность нагрева и ее распределение по поверхности осесимметричной детали в зависимости от требуемой формы расширения ее посадочной поверхности;

- время скрепления или раскрепления соединения с погрешностью до 10%, что необходимо для расчета циклов сборки или разборки;

- режим локального нагрева сложнопрофильной осесимметричной сборочной единицы типа обандаженное колесо железнодорожного транспорта, обеспечивающий качество по предельно-допустимой температуре и напряжениям в материале;

- режим локального нагрева неосесимметричных соединений плоской конструкции типа балансир с торсионом гусеничной машины, обеспечивающий получение равномерного расширения посадочного отверстия сохранения качества по допустимым температурам и напряжениям в материале.

Типизация индукционных нагревателей позволяет выполнять нагрев с высоким коэффициентом мощности ($\cos \varphi$ до 0,6 – 0,7), что уменьшает расход электрической энергии.

Предложена физико-статистическая модель надежности многовиткового индуктора, которая позволяет оценивать гамма-процентный ресурс при малом объеме испытаний ($n \leq 10$)

Исследования позволили выдвинуть научные положения по безразмерной оценке функционирования технологических систем во времени, оценке надежности индукторов, с учетом внезапных и постепенных отказов.

Результаты исследований, которые имеют прикладной характер, внедренные в период с 1973-2006г. в производство на судноремонтных заводах, тепловозоремонтных заводах, заводах тяжелого машиностроения, предприятиях Кубы (по контракту Энергомашэкспорту СССР). Это дало возможность снизить энергозатраты, в зависимости от конструкции и габаритов деталей и соединений от 10% до 25%. Качество функционирования технологических процессов во времени увеличивается на 15% - 20%.

Ключевые слова: технология сборки и разборки, качество технологических процессов, энергосбережение, индукционный нагрев.

ABSTRACT

Reznichenko M.K. Technological foundations for ensuring quality and energy saving in assembling and dismantling processes with induction heating. – Typescript.

The thesis for a Doctor of Science degree in speciality 05.02.08 – Machine-building techniques – is being submitted. National Technical University «Kharkiv

Polytechnical University», 2007.

In the thesis there has been solved the urgent research and application problem of the modern machine-building – lowering power inputs and improving all-in-one joints assembling and dismantling processes using the induction heating for multifunctional assembly units.

There have been defined the low-temperature heating fields of application in assembling and dismantling processes, systemized the joint designs depending on complexity of the thermal action using as well as provided the recommendation in designing the stepped axially symmetric parts which are subjected to the local heating. The general principles of assembling and dismantling processes unification for two- and multipart assembly units have been established.

Reading the joints as a multielement system with unsteady heat transfer between the parts made it possible to define the regularities of discrete induction heating that provide the product quality.

There have been worked out the optimization models of heat source capacity distribution along the part surfaces with different shapes minimizing the power inputs at the set-up limiting temperature, power limiting and metal deformation.

There has been proposed the dimensionless evaluation principle for technological systems operation with the time quality modeling.

There have been typified (standardized) induction heaters in conformity with their functionality and energy efficiency according to joint and heating parts design.

There have been determined the regularities of destroying factors and time action upon the inductor that resulted in physico-statistical modeling of reliability, describing unexpected and gradual failures.

Key words: assembly and dismantling processes, quality of technological processes, economy of energy, induction heating.