

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СБОРКИ И РАЗБОРКИ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

©Резниченко Н. К.

Українська інженерно-педагогічна академія

Информация про автора:

Резниченко Максим Карлович: ORCID: 0000-0002-6989-0120, reznyk@ipm.com.ua, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интеграции технологий в машиностроении та автоматизированного производства, Украинская инженерно-педагогическая академия, вул. Университетська 16, м. Харків, 61003, Україна

В статье рассмотрены вопросы экспериментальных исследований сложнопрофильной детали при сборке соединения с применением индукционного нагрева.

Показано, что такие детали имеют комплексный характер теплоотдачи и теплопередачи и требуют специализированной программы расчета. Учитывая сложность теоретических расчетов и накладываемые допущения при разработке теории расчета возможно появления отклонений с практическими данными.

Установлено, что локальный индукционный нагрев вызывает в центре колеса появление пластических деформаций в дисковой части, поэтому следует строго выдерживать режим технологического процесса нагрева.

В результате проведения эксперимента выявлено хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных, как по температурным режимам, так и возникающим механическим напряжениям.

Ключевые слова: индукционный нагрев; сложнопрофильные детали; температурный режим; теплоотдача; деформация.

Резниченко М. К. «Експериментальні дослідження технологій збирання та розбирання складнопровільних з'єднань».

У статті розглянуті питання експериментальних досліджень складнопровільних деталей при складанні з'єднань із застосуванням індукційного нагріву.

Показано, що такі деталі мають комплексний характер тепловіддачі і теплопередачі і вимагають спеціалізованої програми розрахунку. З огляду на складність теоретичних розрахунків і накладаються допущення при розробці теорії розрахунку можливо поява відхилень з практичними даними.

Встановлено, що локальний індукційний нагрів викликає в центрі колеса поява пластичних деформацій в дисковій частині, тому слід суворо витримувати режим технологічного процесу нагрівання.

В результаті проведення експерименту виявлено гарний збіг експериментальних і теоретичних даних як за температурними режимами, так і виникають механічних напружень.

Ключові слова: індукційний нагрів; складнопровільні деталі; температурний режим; тепловіддача; деформація.

Reznichenko M. "Experimental studies of technologies for assembling and disassembling complex profile compounds".

The questions of experimental studies complex details in the preparation of compounds using induction heating.

It is shown that such details are complex heat transfer and heat transfer and require specialized programs of calculation. Given the complexity of theoretical calculations and assumptions overlapping in the development of the theory of calculating possible deviations appearance with practical information.

It is established that local induction heating causes the appearance of plastic deformations in the disk part in the center of the wheel, therefore it is necessary to strictly maintain the mode of the technological process of heating.

The results of the experiment revealed good agreement of experimental and theoretical data than temperature and mechanical stresses arise.

Key words: induction heating; complex profile parts; temperature regime; heat transfer; deformation.

1. Введение

Технологии, использующие электронгрев широко распространены в промышленности, особенно в машиностроительных отраслях, поскольку имеют такие важные преимущества перед технологиями использующими другие виды нагрева, как хорошая управляемость, экологическая чистота, компактность оборудования.

В настоящее время, выработанные на основе практического опыта методы и средства решения инженерных задач, возникающих в конкретных производственных условиях, связанных с использованием индукционного нагрева для сборки или разборки разнообразных соединений, базируются на ограниченных несистематизированных теоретических положениях сформулированных с различных концептуальных позиций.

Решить проблему энергоэффективности возможно, рассмотрев в комплексе вопросы управления процессом для теоретических и экспериментальных исследований.

2. Обзор литературы

Необходимо отметить, что к работам, которые позволят вскрыть сущность тепловых процессов при сборке соединений, относятся общетеоретические труды по теплопередаче, термоупругости, тепловому режиму твердых тел. Литература здесь весьма обширна и высокого уровня. В значительной мере она определяется трудами советских ученых. Укажем только на фундаментальную работу Лыкова А. В. [1], а так же [2-6].

Среди множества решенных задач теплопроводности и теплопередачи, задачи связанные с нестационарными процессами, наименее разработанные. Имеющиеся аналитические модели нагрева достаточно громоздки и мало универсальны. Для любой из вновь разработанных моделей, будь то модель, учитывающая комплексный характер теплопередачи или теплоотдачу с наружной и внутренней поверхности деталей, как разнофакторных явлений, требуется специализированная программа расчета.

Общие условия разборки соединений с натягом и режима индукционного нагрева деталей были определены Андреевым Г. Я. на основе работ по расформированию вагонных колесных пар [7]. В дальнейших исследованиях, выполненных его учениками, были изучены процессы разборки двухэлементных соединений с охватывающими деталями типа короткая гладкая втулка (внутренние кольца подшипников, с валами и др.) с известными посадками. В работах [8–10] приводятся некоторые данные по технологии разборки крупногабаритных соединений, а в [11] изложены технологические рекомендации, выработанные на основе опыта.

3. Постановка проблемы

Задачами экспериментов являются:

- Определение степени достоверности теоретически полученных результатов путем их сравнения с опытными данными.
- Проверка правомерности некоторых теоретических предположений.
- Получение значений параметров процессов или нагревательного оборудования, которые должны использоваться при выводе теоретических зависимостей или в расчетах.
- Отработка режимов нагрева при сборке и разборке натуральных соединений.

Поскольку сборка нагретых деталей с валами является окончательной операцией (детали последующей обработке не подвергаются), остаточные деформации рабочих поверхностей не должны выходить за поле половины их допуска, и отпуск закаленных поверхностей необходимо исключить.

4. Изложение основного материала

Экспериментальные исследования будем проводить на сложнопрофильном соединении – колесо тепловоза ТМ-40с.

На рисунках 1 и 2 представлены схема и фото колеса тепловоза ТМ – 40 с местами размещения термомпар и терморезисторов по внутренней и наружной поверхностям.

По действующей технологии бандаж устанавливается на центр колеса до упора в бурт после нагрева в газовой печи, и подкрепляется кольцом, вставляемым с противоположной бурту стороне. В собранное колесо после нагрева газовыми форсунами ступицей зона вставляют ось. Натяг в исследуемом соединении бандаж – центр колеса ТМ составляет 1,08 мм, при диапазоне натягов посадки $N_{min}=1,12$ мм и $N_{max}=0,875$ мм натяг в соединении ось – колесо – 0,2 мм. Материал бандажа – бандажная сталь, а центра колеса – сталь 40з. На колесе было смонтировано 48 термомпар. В каждом из четырех радиальных сечений колеса находилось по 12 термомпар, из них 36 на колесном центре, 12 – на бандаже.

В результате эксперимента может быть получено распределение температуры в элементах колесной пары в любой момент времени. При этом значения температуры, зафиксированные многоточечными измерительными приборами в отдельные моменты времени, интерполируются кривыми во времени, с которых снимаются показания для расчетных моментов времени.

Подготовку исследований будем проводить следующим образом. Перед опытами натурные образцы будем сверять с конструкциями, изображенными на чертежах, очищать от смазки и загрязнений. Выполним разметку расположения термомпар и проведем их градуировку.

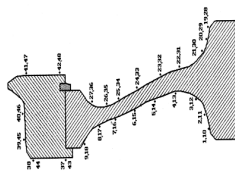


Рис. 1 – Схема колеса теплового ТМ-40 с точками размещения терморпар и розеток тензодатчиков



Рис. 2 – Вид на размещенные на колесе ТМ – 40 терморпары и терморезисторы

Таблица 1 – Расположение терморпар и терморезисторов на колесе теплового ТМ-40

Средний радиус, R _{ср} , м	Внутренняя сторона				Наружная сторона				
	Сечение 4		Сечение 3		Сечение 2		Сечение 1		
	N	Радиус R, м	N	Радиус R, м	N	Радиус R, м	N	Радиус R, м	
Колесный центр									
0,131	28	0,135	19	0,127	0,137	10	0,137	1	0,137
0,136	29	0,139	20	0,132	0,143	11	0,142	2	0,143
0,149	30	0,153	21	0,145	0,159	12	0,159	3	0,159
0,190	31	0,195	22	0,184	0,195	13	0,195	4	0,195
0,224	32	0,232	23	0,216	0,234	14	0,234	5	0,234
0,267	33	0,271	24	0,262	0,272	15	0,271	6	0,272
0,299	34	0,304	25	0,294	0,308	16	0,309	7	0,307
0,324	35	0,325	26	0,322	0,338	17	0,338	8	0,337
0,350	36	0,348	27	0,352	0,364	18	0,363	9	0,365
Канал									
0,413	47	0,412	44	0,414	0,401	41	0,400	37	0,402
0,470	48	0,469	45	0,470	0,458	42	0,460	38	0,455
0,475	49	0,475	46	0,475	0,475	43	0,475	39	0,475

Температуру деталей в процессе нагрева и охлаждения следует контролировать с помощью хромель-копелевых терморпар. Для уменьшения инерционности температур провода должны быть диаметром 0,3 мм. Сварку термоэлектродов осуществлять электроннолучевым способом. Сваренные термоэлектроды должны иметь диаметр штифта не более 0,7 мм. Закреплять терморпары на поверхности деталей следует приваркой контактным способом (конденсаторной сваркой), а в

глубине – в глухих отверстиях диаметром 1мм и длиной соответствующей требуемому положению термонары в отверсти. Для закрепления термонары в отверсти после ее установки заполнить отверстие медными опилками, их утрамбовать и сверху залить жидким стеклом.

Изолировать провода термонар следует жаростойкими кремний органическими нитрами, а поверх надеть металлической заземленный экран. Монтаж термонар на детали провести с помощью флюсовых скобок, привариваемых конденсаторной сваркой.

Термуировку термонар следует выполнять в дистиллированной воде (0 °С и 100 °С) и трансформаторном масле (250 °С), с контролем как абсолютной температуры (сопоставили с показаниями ртутного термометра), так и величины ее разброса по отдельным термонарам. Максимальная величина ошибки вторичного (региструющего) прибора должна быть не более 3 °С. При определении последовательности подключения термонар к вторичным приборам необходимо учитывать максимальные значения и градиенты температуры во времени с тем, чтобы уменьшить время уравнивания измерительной системы.

Размеры посадочных поверхностей деталей соединений необходимо контролировать в двух взаимно-перпендикулярных направлениях по двум или трем поясам равномерно по длине.

Эксперименты с колесом теплового ТТМ-40 включали опыты по его нагреву под посадку на ось, сборки с осью и по определению напряженно-деформированного состояния материала центра и бандажа.

Нагрев колеса выполнялся в соленоидном двухкатушечном индукторе. Для ограничения величины тока в индукторе в цепь включались «жидкие» катушки. После выключения ВНУ в течение 1 мин. осуществлялась установка в колеса ось.

Нагрев колеса длился 6 мин. Электрические параметры индуктора следующие. На 1-й минуте нагрева при напряжении 380В $W_1=53$ кВт и $\cos\varphi=0,51$; на 6-й минуте – $W_6=47$ кВт и $\cos\varphi=0,5$. Данные достаточно хорошо согласуются с расчетными - $W_1=43$ кВт и $\cos\varphi=0,44$.

При нагреве колеса каждую минуту фиксировались расширение отверстия ступицы и электрические параметры индуктора. Расширение отверстия фиксировалось в 3-х сечениях: вблизи «внутренней» части ступицы – $\Delta D_в$, в средней ее части – $\Delta D_с$ и вблизи «наружной» части ступицы – $\Delta D_н$. Усредненные данные по трем опытам представлены в табл. 2. Распределение температур (также усредненные данные) в колесе в процессе его нагрева под посадку на ось и последующего остывания в течение 44 мин. (включая и процесс сборки) представлено на рис. 3.

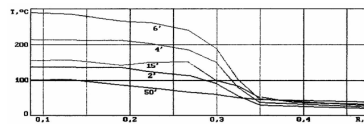


Рис. 3 – Распределение температур (усредненные данные) по радиусу колеса в процессе его нагрева под посадку и остывания в сборе с осью в моменты времени 2, 4, 6, 15, 50 мин. от начала нагрева

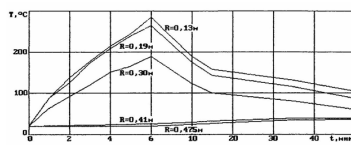


Рис. 4 – Кинетика нагріву і охолодження колеса при посадці його на ось по показанням термометр на різних радіусах

На рис. 4 показано змінення температур в точках по радіусу колеса при нагріві. Эти данные необходимы для теоретических расчетов напряженно-деформированного состояния качества по методу МКМ.

Таблиця 2 – Диаметральное расширение ступицы при нагреве колеса тепловоза под сборку

Диаметральное расширение, мм			Момент времени, t, мин.
ΔD_0 , м	ΔD_1 , м	ΔD_2 , м	
0,0	0,0	0,0	0
0,08	0,09	0,08	1
0,16	0,19	0,17	2
0,25	0,29	0,26	3
0,33	0,37	0,35	4
0,41	0,44	0,43	5
0,48	0,51	0,49	6

Максимальные радиальные и окружные нормальные напряжения в колесе при его нагреве представлены в табл. 3, а распределение – на рис. 5 и рис. 6.

Таблиця 3 – Максимальные напряжения в колесе тепловоза в различные моменты нагрева и после сборки колесной пары, МПа

$R_0 = 0,335$ м		$R_0 = 0,193$ м		Время, мин.	Этапы нагружения
σ_{θ}	σ_{ϕ}	σ_{θ}	σ_{ϕ}		
-175	-333	-132	-322	3	Нагрев ступицы под посадку на ось
-170	-337	-120	-317	6	
19	270	189	316	-	Колесо на оси *)
-235	-310	-115	-314	-	

*) Посадка на ось по старой технологии
**) Посадка на ось по новой технологии

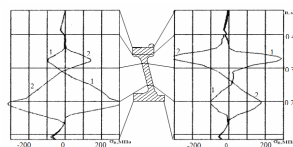


Рис. 5 – Распределение радиальных нормальных напряжений в колесе в момент окончания нагрева: 1 – сборка с нагревом; 2 – запрессовка

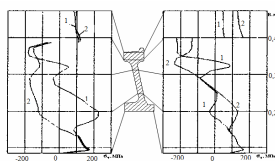


Рис. 6 – Распределение окружных нормальных напряжений в колесе в момент окончания нагрева: 1 – сборка с нагревом; 2 – запрессовка

Выводы

Локальный индукционный нагрев центра колеса для посадки на ось вызывает появление пластических деформаций в дисковой части, которые существенно зависят от скорости и уровня нагрева. Поскольку высокие напряжения в дисковой части приводят к усилению давления на бандаж и, следовательно к ослаблению соединения бандаж-колесный центр, следует строго выдерживать режим технологического процесса гарантированный по качеству технологии сборки может являться сборка по схеме колесный центр на ось, а затем установка на него бандажа.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных о расширении отверстия ступицы колеса при технологическом нагреве и возникающих напряжениях показало:

- удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных о расширении ступицы - в пределах 20 %;
- удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных о напряженном состоянии колесного центра при его индукционном нагреве;
- при посадке собранного колеса на ось независимо от способа сборки

(прессовой или с использованием нагрева) в дисковой части колеса возникают напряжения, вызывающие пластические деформации.

Список использованных источников:

1. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – Введ. в дію: 01.01.1997. – К.: Держстандарт України, 1998. – 32 с.
2. Воробей Л. Н. Технологія машиностроєння і ремонт машин / Л. Н. Воробей. – М.: Вища школа, 1981. – 344 с.
3. ДСТУ EN 614:2001 Безпечність машин. Основні поняття, загальні принципи проектування. Частина 1. Основні принципи безпеки (EN 292:1991, IDT). – Введ. в дію: 01.07.2002.
4. Захаров М. В. Конструктивно-технологічна класифікація сборочних єдиниць / М. В. Захаров, В. П. Ярешко // Вестник Суворовського національного аграрного університету. – 2011. – № 7. – С. 86-92.
5. Корсаков В. С. Автоматизація сборочних робіт / В. С. Корсаков. – М.: Машиностроєння, 1985. – 55 с.
6. Коуден Д. Статистичні методи контролю якості / Д. Коуден. – М.: Фінантгит, 1961. – 276 с.
7. Андреев Г. Я. Тепловая обработка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков: УГУ, 1965. – 227 с.
8. Андреев А. Г. К расчету на прочность трансцендентных колес / А. Г. Андреев, Л. М. Ласотер // Полесько-трансцендентное оборудование. – 1975. – Вып. 6.
9. ДСТУ EN 614:2001. Безпечність машин. Прогнозні принципи проектування. Частина 1. Термінологія та загальні принципи (EN 614-1:1995, IOT). – Введ. в дію: 01.09.2016.
10. Квятка А. Л. Напряжено-деформоване состояние тел шпирити / А. Л. Квятка, П. П. Ворошило, С. Д. Бобринська. – К.: Наук. думка, 1977. – 208 с.
11. Использование напряжено-деформированного состояния колеса тепловикоп IV-7 при термозамке / А. Г. Андреев, Г. Н. Бабакан, В. О. Гагаза, А. В. Шенкин // Отчет по кн 21674, д. с. 886, N гос. регистрации 80052977, ВИНТИ N 0282.0062729, Харьков, 1982. – 149 с.

References

1. Derzhstandart Ukrainy 1994, *Nadiiynist tekhniky. Metody rozrachunku pokaznykiv nadiiynosti. Zahalni vymohy*, DSTU 2862-94, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
2. Vorobei, L. 1981, *Tekhnologiya mashinostroyeniya i remont mashin*, Vysshaya shkola, Moskva.
3. Derzhstandart Ukrainy 2001, *Vezpechnist mashyn. Osnovni ponyattia, zahalni printsypy proektuvaniya. Chastyna 1. Osnovni printsypy bezpeki*, DSTU EN 614:2001 (EN 292:1991, IDT), Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
4. Zakharov, M. & Yaresheko, V. 2011, "Konstruktyvno-tekhnologicheskaya klassifikatsiya sbornichnykh edynits", *Isslediy Samarskogo natsionalnogo agrotimorskogo universitetu* no. 7, pp. 86-92.
5. Korzakov, V. 1985, *Automatizatsiya sbornichnykh rabot*, Mashinostroyeniye, Moskva.
6. Koudein, D. 1961, *Statisticheskiye metody kontrolya kakhestva*, Finmgiz, Moskva.
7. Andreyev, G. 1965, *Teplovaya obrabotka kolosnykh par*, KKhG, Kharkiv.
8. Andreyev, A. & Lisogor, L. 1975, "K raschetu na prochnost' transtsendentnykh kolos", *Pudovno-transportnaya oborudovaniye*, no. 6.
9. Derzhstandart Ukrainy 2001, *Vezpechnist mashyn. Erkonomichesti printsypy proektuvaniya. Chastyna 1. Terminologiya ta zahalni printsypy*, DSTU EN 614:2001 (EN 614-1:1995, IOT), Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
10. Kviatka A. L., Voroshilo P. P., Bobrynska S. D. *Napryazheno – deformovane sostoyaniye tel vshchicheniya*. – K.: Nauk dumka, 1977. – 208 s.
11. Andreev A.G., Babakan G.N., Gageza V.O., Shenkin A.V. *Ispol'zovanie napryazheno-deformirovannogo sostoyaniya kolosa teplovika IV-7 pri termozamke* / Uchet po kn 21674, d. s. 886, N gos. registratsiya 80052977, VINPI N 0282.0062729, Kharkov, 1982. – 149 s.

Стаття надійшла до редакції 11 квітня 2017 р.