

номаренко О. І., Шатагин О. О.; заявник та патентообладатель Націон. Технічний університет «Харківський політехнічний інститут».- № u200603571; заявлено 03.04.06. Опубл. 16.10.2006. Бюл. № 10. – 3 с.

15. Хорошилов, О. Н. Прочность медных сплавов в температурном интервале кристаллизации [Текст] / О. Н. Хорошилов // Лит. пр-во. – М.: – 1999. – № 12.– С. 22 - 23.

16. Патент на корисну модель України № 15924, МПК (2006) G 01 N 3/18. Спосіб випробування зразків у температурному інтервалі кристалізації на повзучість та довготривалу міцність [Текст] / Хорошилов О. М., Пономаренко О. І., Шатагин О. О.; заявник та власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».- № u200601204; заявлено 07.02.06. Опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7. – 6 с.

17. Хорошилов, О. Н. Методика определения высокотемпературной ползучести при испытании образцов из медных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 23-26.

Поступила в редакцию 21.11.13

С. В. Романов, канд. техн. наук
А. Н. Лагода

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина
e-mail: svrom@rambler.ru

УДК 621.757

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ

Ключові слова: розбирання з'єднань, індукційний нагрів, нестационарний тепловий процес, математична модель

Анотація. Розроблена математична модель нестационарного теплового процесу, яка є системою диференціальних рівнянь другого порядку змінної структури залежно від температури елементів багатокомпонентних з'єднань. Модель може бути використана як для керування нагріванням в процесах виплавки наповнювачів, так і для керування нагріванням при тепловому розбиранні з'єднань з натягом.

Введение

Технологические системы (ТС) механосборочного производства, использующие термовоздействие при реализации процессов разборки или выплавки наполнителей, отличается от других ТС нестационарность, поскольку наряду с вещественными преобразованиями в них происходят периодические тепловые изменения элементов. Среди множества решенных задач теплопроводности и теплопередачи задачи, связанные с нестационарными процессами, наименее разработаны. Имеющиеся аналитические модели нагрева достаточно громоздки и малоуниверсальны. Для любой из вновь разработанных моделей требуется своя специализированная программа расчета.

Постановка проблемы

Для обеспечения минимума энергопотребления и максимальной эффективности работы системы термовоздействие должно быть скоростным и адресным, т.е. за минимально короткий промежуток времени необходимо нагреть только те участки охватываемой детали соединения, расширение которых обеспечит требуемый для разборки тепловой зазор или участок корпуса, в котором содержится легкоплавкий наполнитель, подлежащий выплавке [1].

Электронагрев деталей, по сравнению с другими видами нагрева, более производителен и прост в управлении. Он исключает пережог металла и образование окалины. В механосборочном и ремонтном производствах при разборке соединений с натягом, а также для выплавки наполнителей используется индукционный нагрев. Простота исполнения нагревателя и хорошая управляемость процессом, особенно если использовать ток промышленной частоты, являются его достоинствами.

Анализ исследований и публикаций

Достоинства индукционного нагрева являются причиной достаточно широкого распространения в ремонтном производстве технологий разборки на основе термовоздействия. Общепринятые названия этого способа – индукционно-тепловой способ (метод) разборки [2]. Он применяется в судоремонте, ремонте локомотивов, подвижного состава рельсового транспорта, дорожных машин, обогатительного и прессового оборудования и других видов техники. Хорошо зарекомендовал себя

© С. В. Романов, А. Н. Лагода, 2013

этот способ при разборке распредвалов двигателей, элементов рулевого устройства и съеме облицовок с валов в судостроении; разборке элементов колесных пар тепловозов, электровозов и вагонов, в том числе съеме подшипников и др. [3 – 7].

Способ начал применяться при ремонте автобронетанковой техники и показал свои преимущества перед другими способами в разборке соединений с большими натягами и соединениями с пластической деформацией посадочных поверхностей. Но несмотря на очевидные преимущества разборка индукционно-тепловым способом еще не находит должного применения. Анализ используемых на заводах (г. Киев, г. Харьков) и ремонтных базах технологий, показал, что на 70-80 % используется распрессовка и на 10-15 % – пламенный нагрев или прогрев горячим маслом. Связано это с отсутствием промышленно выпускаемых установок для индукционного нагрева и неразработанностью вопросов технологии, в частности тепловых режимов разборки.

Общие условия разборки соединений с натягом и режимы индукционного нагрева деталей были определены Андреевым Г.Я. на основе работ по расформированию вагонных колесных пар [8]. В дальнейших исследованиях, выполненных его учениками, были изучены процессы разборки двух-элементных соединений с охватывающими деталями типа гладкая втулка (внутренние кольца подшипников, облицовка валов и др.) с известными посадками. В работах [4, 6, 9] приводятся некоторые данные по технологии разборки крупногабаритных соединений, а в [10] изложены технологически рекомендации, выработанные на основе опыта.

В рассмотренных работах исследовалось только создание рациональных температурных полей с точки зрения образования теплового зазора разборки, приводились данные для расчета необходимой тепловой энергии, полученные полуэмпирическим путем, и разрабатывались методики и программы для расчетов напряженно-деформированного состояния [10 – 12]. Все расчеты выполнялись без учёта потерь тепла в окружающую среду. Результатов исследований, связанных с рациональным использованием тепловой энергии в литературных источниках крайне мало.

Формулировка целей статьи

Цель работы – разработка теоретических основ, позволяющих минимизировать затраты энергии при расформировании многокомпонентных соединений, разбираемых с помощью электронагрева при ремонте и утилизации.

Разработка математической модели нестационарного теплового процесса

Наиболее эффективен прямой индукционный нагрев, генерирующий тепло в электропроводном материале с удельной мощностью 1КВт/см³ и способный создавать неравномерное температурное поле по сечению детали, изменяемое во времени, а, как отмечалось выше, именно такой нагрев и предпочтителен [13].

Высокая скорость нагрева и лучшие электрические и тепловые характеристики достигаются с помощью индуктора, охватывающего нагреваемую часть детали (или всю деталь). Это индукторы соленоидного типа. Высокая скорость объясняется более сильным магнитным полем внутри индуктора за счет кольцевого эффекта и эффекта близости [14]. Электрический КПД такого индуктора отражает зависимость.

$$\eta_{\text{и}} = 1 / (1 + D1/D2 \sqrt{\rho1 / \mu \rho2}),$$

где $D1$ и $D2$ – внутренний диаметр катушки (по проводникам) и наружный диаметр нагреваемой детали; $\rho1$ и $\rho2$ – удельное сопротивление; μ – относительная магнитная проницаемость материала детали. Как видно, длина детали на $\eta_{\text{и}}$ влияния не оказывает, а зависит он, в основном, от соотношения диаметров $D1 / D2$. Это условие является также ограничением универсальности индукторов соленоидного типа.

Помимо электрического КПД индукционной установки составляющей частью ее полного КПД является тепловой КПД - $\eta_{\text{т}}$.

Общее количество теплоты, затрачиваемое на разборку соединения или на выплавку наполнителя, определяется суммой $Q_o = Q_m + Q_{\partial(n,n)} + Q_{\partial}$, где Q_m – тепло для нагрева охватывающей детали до температуры, обеспечивающей для разборки тепловой зазор или тепло для нагрева корпуса, из которого необходимо извлечь наполнитель, до температуры плавления последнего; $Q_{\partial(n,n)}$ – тепло, передаваемое в охватываемую деталь или необходимое для расплавления вещества; Q_{∂} – потери тепла в ок-

ружающую среду. В случае разборки соединения $\eta_m = Q_m/Q_o$. При выплавке наполнителя $\eta_t = Q_{на} / Q_o$. Обе величины и η_u и η_m составляют полный КПД индукционной установки, определяемый произведением

$$\eta = \eta_u \eta_m .$$

Как видно, η_u будет определяться конструкцией индукционной установки и размерами нагреваемой детали. На η_u и η_m помимо конструкции нагревателя в значительной мере влияет технологический процесс разъединения компонентов соединения. Особенно ярко это проявляется при выплавке наполнителя из ферромагнитного корпуса, т.к. здесь наблюдается изменение агрегатного состояния извлекаемого вещества. В некоторых случаях для извлечения наполнителя не требуется полное его расплавление.

Для составления технологического процесса необходимо иметь полное представление о процессах, происходящих в компонентах соединения.

Наилучшим образом на стадии проектирования это можно сделать, используя математическую модель описываемого процесса. Целесообразно из электротеплоэнергетической выделить ее наиболее инерционную часть – тепловую. Это связано с тем, что постоянные времена тепловых и электроэнергетических процессов различаются между собой на несколько порядков, а управление процессом должно вестись по наиболее инерционной переменной состояния.

Решение общей задачи нестационарного теплового процесса нужно разбить на два этапа. Первый этап, как для случая разъединения двухкомпонентной системы посредством образования теплового зазора, так и для случая выплавки наполнителя из ферромагнитного корпуса, будет описываться одной и той же системой дифференциальных уравнений

$$C_1 d\tau_1/dt = -\lambda_6(\tau_1-\tau_6) -\lambda(\tau_1-\tau_2) + P_1 ; C_2 d\tau_2/dt = \lambda(\tau_1-\tau_2) \quad (1)$$

при $\tau_1(0) = \tau_{10}$ и $\tau_2(0) = \tau_{20}$,

где λ – тепловая проводимость между охватывающей и охватываемой деталями или между ферромагнитным корпусом и наполнителем, а также от корпуса в окружающую среду; λ_6 – тепловая проводимость между охватывающей деталью или ферромагнитным корпусом и окружающей средой ; C_1, C_2 - теплоемкости ферромагнитного корпуса и наполнителя, соответственно, а τ_1 и τ_2 – температуры; P_1 – подведенная мощность, т.е. мощность, необходимая только для нагрева.

Так как средняя температура охватываемой детали или вещества наполнителя является величиной неизмеряемой, ее необходимо исключить из математической модели, сведя систему (1) к одному дифференциальному уравнению более высокого порядка. Из первого уравнения системы (1) выделим τ_2

$$\tau_2 = (C_1 d\tau_1/dt + (\lambda + \lambda_6)\tau_1 - \lambda_6 \tau_6 - P_1) / \lambda .$$

Подставим τ_2 во второе уравнение системы (1)

$$d\tau_2/dt = -\lambda[(C_1 d\tau_1/dt + (\lambda + \lambda_6)\tau_1 - \lambda_6 \tau_6 - P_1) / \lambda - \tau_1] / C_2 . \quad (2)$$

Продифференцировав первое уравнение системы (1) по dt , подставив в него (2) и, произведя группировку относительно производных τ_1 , получим:

$$\begin{aligned} d^2\tau_1/dt^2 + (\lambda_1/c_1 + \lambda_6/c_1 + \lambda/c_2) d\tau_1/dt + (\lambda \lambda_6/c_1/c) \tau_1 = \\ = (\lambda/c_1/c_2)P_1 + (\lambda\lambda_6/c_1/c_2)\tau_6, \end{aligned} \quad (3)$$

при $\tau_1(0) = \tau_{10}$ и $d\tau_1/dt|_{t=0} = P_1/c_1 - \lambda_1/c_1 (\tau_{10} - \tau_{20}) - \lambda_6/c_1 (\tau_{10} - \tau_6)$.

Установившееся значение температуры охватывающей детали или ферромагнитного корпуса можно получить из (3), полагая в нем $\tau_{уст} = \tau_1 = \text{const}$, т. е.

$$\tau_{уст} = \tau_1 = P_1/\lambda_6 + \tau_6.$$

Тогда полное решение (3) имеет вид

$$\tau_1 = D_1 e^{a_1 t} + D_2 e^{a_2 t} + \tau_6 + P_1 / \lambda_6. \quad (4)$$

Показатели степени a_1 и a_2 находятся как корни характеристического уравнения (1)

$$a^2 + (\lambda/c_1 + \lambda_6/c_1 + \lambda/c_2)a + \lambda \lambda_6/c_1/c_2 = 0.$$

Постоянные интегрирования D_1 и D_2 определяются из системы уравнений для начальных условий

$$\tau_{10} = D_1 + D_2 + \tau_6 + P_1 / \lambda_6; \quad d\tau_1(0)/dt = a_1 D_1 + a_2 D_2.$$

Полученные решения позволяют, используя (4) и первое уравнение системы (1), найти τ_2

$$\tau_2 = c_1 / [\lambda(a_1 D_1 e^{a_1 T} + a_2 D_2 e^{a_2 T})] + \tau_1 + \lambda_6 / \lambda \tau_1 - \lambda_6 / \lambda \tau_6 - P_1 / \lambda. \quad (5)$$

Вычитая из (4) уравнение (5), можно найти закономерность изменения разности средних температур τ_1 и τ_2 в функции времени:

$$\Delta\tau(t) = \tau_1(t) - \tau_2(t),$$

которая имеет экстремум при $d\Delta\tau/dt = 0$.

При максимуме $\Delta\tau$ обеспечиваются наилучшие условия для разъединения компонентов соединения, требующих для разборки образования теплового зазора. Зная требуемую величину зазора (а значит $\Delta\tau$) и температуру τ_1 , легко определить максимальную подводимую мощность P_1 .

Для случая выплавки наполнителя первый этап не является заключительным, т.к. он позволяет, задавшись τ_1 и τ_2 , оптимально подобрать параметры нагревателя только до момента, когда τ_2 достигнет температуры плавления извлекаемого вещества $\tau_{нл}$. Поэтому второй этап решения задачи будет касаться только процесса выплавки наполнителя.

Баланс энергии до полного перехода вещества наполнителя из твердой фазы в жидкую имеет вид

$$C_1 d\tau_1/dt + \lambda_n (\tau_1 - \tau_{нл}) + \lambda_6 (\tau_1 - \tau_6) = P_1; \quad q_{нл} dm_n/dt = \lambda_n (\tau_1 - \tau_{нл}) \quad (6)$$

при начальных $\tau_1(0) = \tau_{1н0}, \tau_2(0) = \tau_{нл}, m_n(0) = 0$,

где $\tau_{1н0}$ – температура ферромагнитного корпуса, полученная на первом этапе расчетов; m_n – масса расплавленного наполнителя; $q_{нл}$ – удельная теплота плавления вещества; λ_n – коэффициент теплопередачи между ферромагнитным корпусом и расплавленным наполнителем.

Решение системы уравнений (6), представляющей собой два взаимосвязанных, но независимо разрешаемых дифференциальных уравнения, имеет форму

$$\tau_1 = D_{нл} e^{-t/T_{нл}} + (P_1 + \lambda_n \tau_{нл} + \lambda_6 \tau_6) / (\lambda_n + \lambda_6), \quad (7)$$

где $T_{нл} = c_1 / (\lambda_6 + \lambda_n)$ – постоянная времени процесса плавления вещества-наполнителя; $D_{нл} = (\tau_{1н0} - \tau_{1нк})$ – постоянная, определяемая из начальных условий $\tau_1(0) = \tau_{1н0}$; $\tau_{1нк} = (P_1 + \lambda_n \tau_{нл} + \lambda_6 \tau_6) / (\lambda_n + \lambda_6)$ – квазиустановившееся значение температуры ферромагнитного корпуса.

Подставив (7) во второе уравнение системы (6), найдем для заданной массы расплавленного вещества

$$m = [\lambda_n / q_{нл}] [(\tau_{1нк} - \tau_{нл}) t - T_{нл} (\tau_{1нк} - \tau_{1н0})] + [\lambda_n / q_{нл}] T_{нл} (\tau_{1нк} - \tau_{1н0}) e^{-t/T_{нл}}. \quad (8)$$

Для практического использования уравнение (8) целесообразно преобразовать, записав его в относительных единицах массы и времени, приняв в качестве базовых величин $m_0 = \lambda_n T_{нл} (\tau_{1нк} - \tau_{нл}) / q_{нл}$ – массу расплавленного вещества за время $T_{нл}$ при мощности: $P_{нл} = \lambda_n (\tau_{1нк} - \tau_{нл})$; $T_0 = T_{нл}$

Тогда, разделив правую и левую части (8) на m_0 , получим

$$M = T - [(\tau_{1mk} - \tau_{1n0}) / (\tau_{1mk} - \tau_{1n1})] (1 - e^{-T}), \quad (9)$$

где M и T – масса расплавленного вещества и время в относительных единицах.

Из уравнения (9) можно определить как время, необходимое для выплавки требуемого количества наполнителя, так и расходуемую при этом с учетом теплоотдачи в окружающую среду энергию.

Выводы

Предложенная математическая модель, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка переменной структуры в зависимости от температуры наполнителя, может быть использована как для управления нагревом в процессах выплавки, так и для управления нагревом при тепловой разборке многоэлементных соединений с натягом.

Литература

1. Арпентьев, Б. М. Новый метод определения составляющих тепловой проводимости [Текст] : сб. науч. труд. / Б. М. Арпентьев, А. К. Дука, А. Н. Куцын // Хар. Инст. соц. прогресс. – Харьков. – 1997. – №2. – 186 с.
2. Новиков, М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов [Текст] / М. П.Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
3. Калугин, М. Г. Монтаж и ремонт механизмов морских судов [Текст] / М. Г. Калугин. - М.: Транспорт, 1971. – 432 с.
4. Морозов, А. Н. Индукционно тепловой метод съема шестерен с вала электровозных тяговых двигателей [Текст] / А. Н. Морозов, Н. М. Лактионов // Вестник машиностроения. - 1980. - № 4. - С. 25 – 28.
5. Корсакова, В. С. Сборка и монтаж изделий машиностроения. [Текст] : справочник в 2-х томах / В. С. Корсакова, В. К. Замятина. - М.: Машиностроение, - Т.1 - 1983. – 480 с.
6. Андреев, Г. Я. Съем и насадка облицовок гребных валов индукционно – тепловым методом [Текст] / Г. Я.Андреев, Н. М.Лактионов, А.Н.Морозов, Е.С.Виглин // Судостроение. – 1978. – № 10. – С. 75 – 78.
7. Кравцов, М. Анализ влияния некоторых факторов на качество индукционно-тепловой сборки подшипниковых узлов / М. Кравцов, В. Акимов, О. Акимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 5, N 5(47). - С. 63-67. – Режим доступа : URL : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3162>.
8. Андреев, Г. Я. Тепловая сборка колесных пар [Текст] / Г. Я.Андреев. - Харьков: ХГУ, 1965. – 227 с.
9. Андреев, Г. Я. Индукционно-тепловая разборка соединений с большими натягами при ремонте кузнечно – прессового оборудования [Текст] / Г. Я.Андреев, А. Н. Морозов, Н. М. Лактионов // Кузнечно-штамповочное пр-о. – 1978. – №2. – С. 29– 32.
10. Андреев, Г. Я. Тепловая разборка соединений с натягом [Текст] / Г. Я.Андреев, Б. М. Арпентьев, Б. Г.Кокшенев // Технология и организация производства. – 1972. – № 1. – С. 96 –99.
11. Андреев, Г. Я. Расчет некоторых параметров тепловой разборки соединений [Текст] / Г. Я. Андреев, Н. М. Лактионов, Е. С. Виглин // Вестник машиностроения. – 1974. – № 7. – С. 31 – 34.
12. Дука, А. К. Расчет теплового режима составных соединений, собираемых с нагревом [Текст] / А. К. Дука, Б. М. Арпентьев // Известия ВУЗов. Машиностроение . – 1989. - № 2. - С. 115 – 120.
13. Зенкин, А. С. Сборка неподвижных соединений термическим методом [Текст] / А. С. Зенкин, Б. М. Арпентьев. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
14. Слухоцкий, А. Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Энергия. – 1974. – 264 с.

Поступила в редакцию 20.11.13