

С. В. Дзлийев, К. Е. Пищалева,
Д. М. Жнакин, Ю. Ю. Перевалов

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены проблемы нагрева крупногабаритных машиностроительных деталей (бандажные кольца турбогенераторов и рабочие колеса паровых турбин) для монтажа и демонтажа способом горячей посадки на вал. Обоснованы преимущества высокочастотного индукционного нагрева по сравнению с нагревом в печи, газовым нагревом и индукционным нагревом на промышленной частоте. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований на промышленных объектах.

Высокочастотный индукционный нагрев, горячая посадка, бандажные кольца турбогенераторов, рабочие колеса паровых турбин

Выработка электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях производится с помощью турбогенераторов, которые приводятся во вращение паровыми турбинами. Мощность этих агрегатов достигает 1200 МВ·А, масса – десятков тонн, а скорость вращения – 3000 об/мин, поэтому конструктивно для крепления деталей на валах роторов турбогенераторов и турбин используется способ горячей посадки, не создающий в деталях несимметричных напряжений, способных вызвать опасные локальные концентрации механических напряжений и вибрации.

На валу ротора турбогенератора способом горячей посадки крепятся бандажные кольца, контактные кольца, полумуфты, вентиляторы, а на валу ротора паровой турбины – до десяти рабочих колес с турбинными лопатками, полумуфты и другие детали. Масса одной насадной детали может достигать 3,5 т.

Монтаж деталей на вал производится при сборке агрегатов на заводах-изготовителях, например ОАО «Силовые машины», а полный цикл – демонтаж и монтаж – при плановых и капитальных ремонтах как на тепловых и атомных электростанциях, так и на специализированных ремонтных заводах.

Суть способа горячей посадки заключается в том, что насаживаемую деталь с диаметром отверстия меньшим, чем диаметр вала, нагревают до температуры 200...400 °С (для увеличения диаметра отверстия из-за температурного расширения металла) и устанавливают в нагретом состоянии на вал. После остывания детали возникает прочное соединение, выдерживающее рабочие усилия. Разница между диаметрами детали и вала в холодном состоянии (натяг) составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Зазор между валом и нагретой деталью при посадке обычно не превышает 1...2 мм, так как предельная температура нагрева ограничена опасностью изменения структуры металла и термостойкостью близлежащей электрической изоляции. Столь малый зазор в нагретом состоянии создает проблемы при установке массивных и крупногабаритных деталей, поскольку требует большой точности и высокой скорости проведения операции, которая может закончиться аварийно из-за остывания детали до установки ее в нужное положение.

Традиционно детали при монтаже нагреваются в газовых или электрических печах, газовыми горелками или индукционным способом на промышленной частоте. Нагрев при демонтаже производится индукционным способом на промышленной частоте или газовыми горелками.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих способов нагрева.

Нагрев в печи производится только при монтаже и возможен только на заводах изготовителях или ремонтных заводах; при проведении плановых ремонтных работ на электростанциях этот способ неприменим. Транспортировка горячей детали от печи до места проведения монтажных работ приводит к остыванию детали, поэтому требуется перегрев детали в печи выше температуры, требуемой для монтажа. Непредвиденные задержки при транспортировке и в процессе насадки на вал могут привести и часто приводят к недопустимому остыванию детали, уменьшению диаметра ее отверстия и, в тяжелых случаях, к фиксации детали не на расчетном месте. Это тяжелая авария, требующая длительной и дорогостоящей работы по снятию с нештатной посадки детали или к удалению ее путем механического разрушения.

Нагрев газовыми горелками может использоваться при монтаже и демонтаже деталей, однако он имеет существенные недостатки, заставляющие большинство заводов отказываться от этого способа в пользу индукционного нагрева. Главными недостатками газового нагрева являются: открытое пламя и связанная с этим опасность возгорания или оплавления изоляционных элементов конструкции, возможность недопустимых изменений структуры металла из-за локальных перегревов поверхности деталей, ухудшение условий труда и экологической обстановки в цехе. Кроме того, скорость нагрева газом может быть недостаточна для разъединения деталей при демонтаже, особенно с учетом сложности локализации нагрева детали и практически неизбежного нагрева прилегающих частей конструкции.

Индукционный нагрев на промышленной частоте применяется в двух вариантах: трансформаторном, когда энергия переменного магнитного поля передается от катушки индуктора в нагреваемую деталь через магнитопровод, и в варианте непосредственного помещения нагреваемой детали в катушку индуктора.

Трансформаторный способ с успехом применяется при монтаже, но непригоден для демонтажа деталей. Нагревательная установка трансформаторного типа питается непосредственно от сети без преобразователя частоты, имеет сравнительно небольшие размеры и может быть установлена вблизи монтажного участка; она позволяет нагревать различные насадные детали существенно быстрее, чем в печи. К недостаткам следует отнести невозможность нагрева в ходе проведения такелажных работ по насадке детали, что создает опасность аварийного прерывания процесса из-за преждевременного ее остывания.

Нагрев в индукторе на промышленной частоте производится либо в специализированных индукторах с водяным охлаждением, изготавливаемых для каждой конкретной детали, либо с помощью водоохлаждаемого индуктора-провода, наматываемого на различные нагреваемые детали. Достоинством нагрева в индукторе на промышленной частоте является универсальность – возможность использования и при монтаже, и при демонтаже различных деталей. Недостатки связаны с большими токами индуктора и, следовательно, с большой напряженностью внешнего магнитного поля, которое не только ухудшает экологическую обстановку, но и приводит к вредному нагреву прилегающих стальных деталей, снижающему эффективность нагрева.

Рассматривая эффективность индукционного нагрева на промышленной частоте, необходимо особо выделить из множества насадных деталей бандажные кольца турбогенераторов, которые изготавливаются из немагнитных металлов – легированных сталей, ти-

тановых или алюминиевых сплавов. Глубина проникновения тока в немагнитный металл на промышленной частоте превышает толщину бандажных колец, что обуславливает следующие отрицательные эффекты при нагреве бандажных колец для демонтажа:

- нагрев вала полем через бандажное кольцо, что снижает эффективность операции демонтажа из-за расширения вала и требует повышения температуры нагрева бандажа;
- возникновение электрических разрядов между бандажом и валом при потере контакта (при разъединении бандажа и вала), что ведет к электроискровой эрозии внутренней поверхности бандажа, которая может послужить причиной развития трещин в процессе эксплуатации. Учитывая тяжелый режим эксплуатации бандажных колец и тяжелые последствия аварии при разрыве бандажного кольца, эту опасность безусловно необходимо устранить;
- максимальную температуру в процессе нагрева имеют внутренние слои детали, не доступные для оперативного контроля, поэтому невозможно гарантировать соблюдение безопасного температурного режима нагрева.

Индукционный нагрев на высокой частоте для монтажа и демонтажа крупногабаритных деталей способом горячей посадки сравнительно недавно начал внедряться на электромашиностроительных заводах и электростанциях России. Способ прошел стадии теоретических и экспериментальных исследований, испытаний в промышленных условиях на заводах «Электросила» и «ЛМЗ» ОАО «Силовые машины» и принят в качестве основного при монтаже и демонтаже бандажных колец роторов турбогенераторов и рабочих колес роторов паровых турбин мощностью до 1200 МВт [1], [2]. К настоящему времени выпущено специализированное оборудование ООО «ИНТЕРМ»¹ [3], которое включает в свой состав транзисторные преобразователи частоты серии ТГИ, работающие в частотном диапазоне 66 кГц, гибкие индукторы из термостойкого провода и медной ленты без водяного охлаждения, а также блоки согласования индукторов с преобразователем частоты.

На рис. 1 показан нагрев двумя ленточными индукторами для снятия с горячей посадки титанового бандажного кольца ротора турбогенератора мощностью 890 МВ·А, а на рис. 2 – нагрев индуктором-проводом для снятия с горячей посадки рабочего колеса ротора паровой турбины с помощью оборудования ООО «ИНТЕРМ».

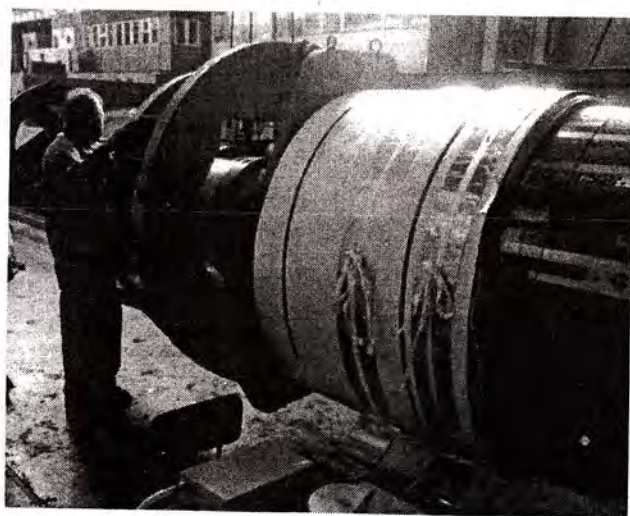


Рис. 1

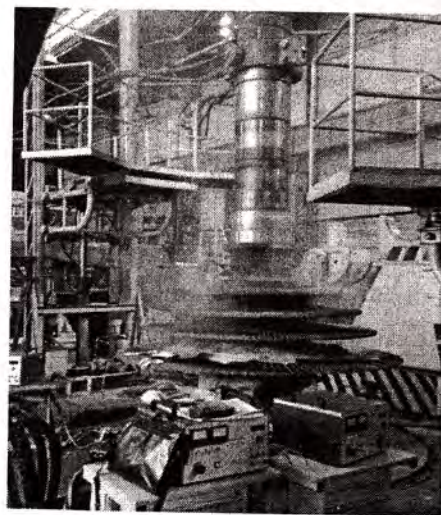


Рис. 2

¹ www.interm.su.

Эффективность индукционного нагрева столь крупногабаритных деталей на частоте 66 кГц не очевидна. Как правило, при нагреве массивных деталей применяется более низкая частота для быстрого прогрева глубинных слоев детали, однако при нагреве под горячую посадку время нагрева не играет существенной роли – нагрев производится с низкой удельной мощностью 2...10 Вт/см² и на первый план выступают следующие преимущества высокочастотного индукционного нагрева на частоте 66 кГц:

- глубина проникновения тока меньше толщины нагреваемых деталей, поэтому не прогревается вал и не происходит электроискровая эрозия на границе «вал–деталь»;

- при высокочастотном индукционном нагреве максимальную температуру имеет поверхность детали, где температура доступна для контактного или бесконтактного контроля и регулирования, что позволяет гарантировать качество нагрева, т. е. вести нагрев на предельных скоростях без опасности ухудшения кристаллической структуры металла из-за его перегрева;

- низкие значения токов позволяют использовать гибкие и легкие индукторы без водяного охлаждения. Специально разработанные конструкции индуктора-ленты для нагрева бандажных колец из немагнитных металлов и индуктора-провода для нагрева магнитных стальных деталей работают при естественном воздушном охлаждении, что обеспечивает удобство эксплуатации, а также устраняет опасность попадания воды на элементы конструкции ротора при авариях;

- на более низкой частоте ток индуктора возрастает, что требует водяного охлаждения, обуславливает значительные электродинамические усилия, а также приводит к повышению напряженности магнитного поля, отрицательно влияющего на здоровье обслуживающего персонала;

- на более высокой частоте повышается напряжение на индукторе, что может приводить к высокочастотным разрядам и пробоям, электроискровой эрозии поверхности детали;

- напряженность внешнего магнитного поля индуктора существенно ниже, чем при нагреве на промышленной частоте, что предотвращает нагрев прилегающих деталей, уменьшает радиопомехи и улучшает условия труда и экологическую обстановку в цехе;

- нагрев деталей может производиться непосредственно на месте выполнения операций монтажа или демонтажа ввиду малогабаритности и мобильности оборудования;

- низкое напряжение на индукторе при нагреве бандажного кольца индуктором-лентой и потенциальная развязка индуктора с помощью малогабаритного высокочастотного трансформатора или конденсаторов упрощают изоляцию индуктора, позволяют продолжать нагрев в процессе выполнения такелажных работ и передвижения бандажного кольца на валу, обеспечивают безопасность работы персонала;

- при нагреве магнитной детали многовитковым индуктором с большим межвитковым шагом распределение индуцированного тока в детали выравнивается за счет проведения магнитного потока по магнитной детали, что позволяет использовать индуктор-провод без опасности локального перегрева детали под проводом (полосатого нагрева); преимуществом индуктора-провода является возможность его согласования с источником питания без согласующего высокочастотного трансформатора за счет выбора соответствующей длины провода, а также его универсальность – индуктор-провод одной и той же длины может использоваться при нагреве деталей различного размера;

- автоматизированное высокочастотное нагревательное оборудование ООО «ИНТЕРМ» обеспечивает прецизионный контроль и регулирование температуры нагрева, оперативную графическую визуализацию основных параметров и протоколирование процесса нагрева.

Насадные детали роторов турбогенераторов и паровых турбин имеют сложную форму, различаются материалом (магнитная или немагнитная сталь, титановый или алюминиевый сплав), диаметром и длиной посадочного контакта, натягом, числом мест посадки.

При монтаже целесообразно стремиться к равномерному нагреву бандажного кольца турбогенератора, чтобы увеличить его внутренний диаметр на всей длине, так как необходимо не только насадить кольцо на зубцы ротора, но и обжать лобовые части обмотки. При демонтаже целесообразно нагревать только область посадки так, чтобы бандажное кольцо сошло с зубцов ротора. При этом из-за локального нагрева возникают внутренние напряжения с плавным переходом от расширенного горячего участка к недеформированному холодному. Это явление учитывается в конструкции бандажных колец, в которой предусматривается уменьшение толщины кольца в переходной зоне для снижения внутренних напряжений при нагреве.

Нагреть деталь равномерно по всему объему можно только в печи. При этом температура нагрева до требуемого расширения может быть определена по формуле

$$T = \Delta D / (\alpha D), \quad (1)$$

где D – диаметр отверстия нагреваемой детали при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; ΔD – требуемое увеличение диаметра отверстия при нагреве; α – коэффициент линейного расширения металла, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, который берется из справочной литературы [4], [5].

При индукционном нагреве температурное поле неравномерно как в процессе нагрева, так и во время проведения операции монтажа или демонтажа. При этом для достижения требуемого расширения средняя температура детали, а следовательно, и ее теплосохранение, должны быть больше, чем при равномерном нагреве, из-за внутренних механических напряжений и деформаций. В таком случае значение температуры, полученное по формуле, является оценкой снизу. Кроме того, при снятии детали с посадки до потери контакта между деталью и валом происходит передача тепла в вал, что ведет к его расширению. Тогда оценка (1) представляет собой минимальную разницу температур между валом и деталью (в случае одинаковых коэффициентов линейного расширения материалов детали и вала).

Достаточно точные оценки достижения требуемых деформаций при ограничениях температуры нагрева дает компьютерное моделирование – численное решение взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и деформационных задач при точном задании формы и свойств материала детали и индуктора. По этой причине при отработке технологии нагрева для монтажа и демонтажа сложных деталей способом горячей посадки целесообразно использовать компьютерное моделирование. Модели позволяют оптимизировать параметры индукционной системы и режима нагрева и дать рекомендации для практики.

При разработке модели необходимо учитывать, что электромагнитные свойства материалов мало изменяются при нагреве в пределах допустимого диапазона температур ($20\text{..}450\text{ }^{\circ}\text{C}$) и необходимости в частом пересчете электромагнитной задачи нет. Кроме того, настил тока при нагреве деталей из немагнитных материалов индуктором-лентой и при нагреве деталей из магнитных материалов индуктором-проводом достаточно равномерен, а глубина проникновения относительно невелика, поэтому с небольшой погрешностью можно рассчитывать структурно-тепловую задачу без расчета электромагнитной, приняв постоянной удельную мощность, приложенную к нагреваемым поверхностям.

При оценке реальной удельной поверхностной мощности нужно учесть, что электрический КПД системы «индуктор-провод – магнитная деталь» составляет около 95 %, а КПД системы «индуктор-лента – немагнитная деталь» – около 80 %.

Для оценки погрешности модели был выполнен эксперимент, данные которого – график мощности нагрева, форма и размеры детали и индуктора, а также свойства материалов – использованы при моделировании. На рис. 3 показаны результаты – расчетные и экспериментальные графики мощности (кривая 1) и температуры бандажного кольца под индуктором-лентой (кривая 2 – экспериментальная, кривая 3 – расчетная). Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS [6]. Отклонение расчетных результатов от экспериментальных не превышает 10 %, что говорит об адекватности моделей и возможности использования результатов моделирования для выработки практических рекомендаций и разработки технологии нагрева.

Примером таких рекомендаций, выработанных на базе компьютерного моделирования, могут служить представленные на рис. 4 зависимости от мощности нагрева двух важных параметров – времени снятия с посадки рабочего колеса ротора турбины массой 3200 кг (кривая 1) и максимальной температуры нагрева колеса в момент его освобождения (кривая 2). Решалась задача нагрева рабочего колеса тремя индукторами при одинаковой мощности в каждом из них. По графикам можно оценить оптимальный диапазон возможной мощности нагрева – от 30 до 40 кВт каждым индуктором, в котором операция демонтажа рабочего колеса происходит без его перегрева выше 430 °С. При снижении или повышении мощности нагрева разъединение рабочего колеса и вала происходит при более высоких температурах, которые могут ухудшить кристаллическую структуру металла. При мощности 30 кВт время нагрева составляет 3 ч 10 мин, а при 40 кВт – 1 ч 40 мин.

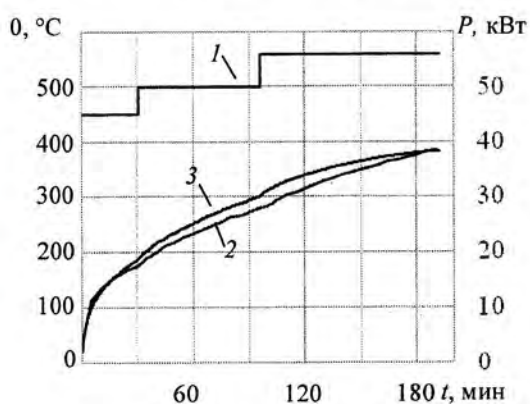


Рис. 3

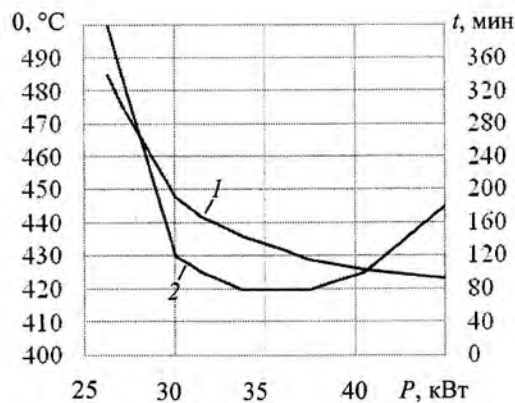


Рис. 4

Ясно, что при технической возможности нагрева на максимальной мощности из допустимого диапазона этот режим предпочтителен, однако возможно проведение операции и при нагреве на мощности 30 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование нагрева бандажей роторов турбогенераторов высокочастотным индукционным методом / И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло, С. В. Дзлийев, И. В. Позняк // *Электричество*. 2003. № 5. С. 23–31.
2. Пат. РФ № 2251823. Гибкий индуктор для нагрева цилиндрических тел. Н05В / С. В. Дзлийев, И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло; опубл.: 10 мая 2005.
3. Дзлийев С. В. Источники питания индукционных нагревательных комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 214 с.

4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение-1, 2003. 784 с.
5. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Metallurgizdat, 1956. 560 с.
6. Красновский Е. Е. Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS. Методические указания. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

S. V. Dzliev, K. E. Pischalev, D. M. Zhnakin, Yu. Yu. Perevalov

HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATING OF LARGE-SIZED DETAILS

In this article examined problems of heating of large-sized machine parts (bandaging rings of turbogenerators and working wheels of steam turbines) for mounting and dismounting onto shaft using shrink fit. Justified the advantages of high-frequency induction heating as compared with heating in a furnace, gas heating and induction heating at 50 Hz. Shown results of modeling and experimental studies on industrial sites.

High-frequency induction heating, shrink fit, bandaging rings of turbogenerators, working wheels of steam turbines

УДК 5

О
В
А

Плюс

Ра

электри

рис. 1

стном с

стве гео

И:

СИСТЕМ

рически