



Promising directions of induction heating are analyzed.

И. А. ТРУСОВА, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 669.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА. СООБЩЕНИЕ 1. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В работах [1, 2] приведен анализ состояния технологий и оборудования индукционного нагрева в Республике Беларусь, где отмечено, что индукционный нагрев на промышленных предприятиях в настоящее время занимает значительное место и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными нагревательными устройствами. Это прежде всего высокий коэффициент полезного действия и компактность индукционных установок, позволяющих встраивать их в линии механической обработки, высокая производительность операций нагрева, формирование на поверхности деталей термически упроченных слоев, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик и специальных свойств. Следует отметить, что индукционный нагрев чаще всего применяют при проведении операций штамповки (27%), заковки (56%), плавки (9%) и пайки (8%). Среди отечественных предприятий, на которых используется индукционное оборудование, можно выделить РУП «МТЗ» и ОАО «МАЗ», (г. Минск), ОАО «Белкард» (г. Гродно), «Автогидроусилитель» (г. Борисов), ПО «Гомсельмаш» (г. Гомель), РУП «КЗТШ» (г. Жодино), где сосредоточена половина индукционного оборудования Республики Беларусь. Авторы указанных работ отмечают, что около 70% используемых на этих предприятиях генераторов индукционного оборудования имеют 100%-ный износ, 20% – износ более 50% и 10% – износ менее 50%. Поэтому в настоящее время перед промышленными предприятиями стоит очень важная задача по модернизации и замене имеющегося индукционного оборудования, выработавшего свой ресурс. Актуальными также остаются задачи по

энерго- и ресурсосбережению, которые невозможно решить без внедрения нового высокопроизводительного и энергосберегающего оборудования. Положительной тенденцией является то, что в последние годы в Республике Беларусь освоено производство генераторов и оборудования индукционного нагрева отечественного производства. Также в рассматриваемых работах авторы уделяют внимание расширению области индукционного нагрева в кузнечном производстве с заменой газовых нагревательных печей на автоматизированные кузнечные индукционные нагреватели. Перспективность этого направления заключается в том, что в условиях постоянного роста цен на энергоносители, в первую очередь природный газ, индукционный нагрев позволяет получить экономический эффект. Кроме того, только индукционное оборудование в этом секторе дает возможность полностью автоматизировать технологический процесс перемещения заготовки от заводской тары до рабочего места кузнеца (а в будущем и автоматизировать процесс ковки), что минимизирует присутствие человека во вредных условиях кузнечного производства.

О преимуществах применения индукционного нагрева в рамках машиностроительных предприятий с серийным производством заготовок горячей штамповкой и замены газовых печей индукционными нагревателями отмечено также в работе [3].

Однако этот вопрос рассматривался еще в 70-х годах прошлого столетия. В частности, в работе [4] авторы оценили возможность использования как чисто индукционного нагрева, так и комбинированного пламенно-индукционного нагрева в качестве оптимизации теплоэнергетической работы

индукционных нагревательных установок в условиях машиностроительных производств. В указанной работе приведена зависимость температуры заготовок перед индуктором в пламенно-индукционной установке от распределения энергозатрат между обеими частями установки. Авторы работы [4] провели также экспериментальную оценку доли металла, перешедшего в окалину в обоих вариантах, при этом было показано, что средняя величина потерь металла с окалиной составила всего 0,5%, а капитальные затраты и расход электроэнергии сокращаются в 2 раза по сравнению с индукционным нагревом.

В [5] отмечено, что проблемам оптимизации режимов работы индукционных нагревателей также посвящены работы Э. Я. Рапопорта, А. И. Данилушкина, С. А. Горбаткова, М. Б. Коломейцевой, М. Ю. Лившица, Л. С. Зимина, П. П. Носова, Л. В. Синдякова, Н. И. Малешкина и др. Задачи оптимизации процессов индукционного нагрева исследовались, главным образом, применительно к установкам периодического и непрерывного действия в установившихся и переходных режимах их работы.

Автор работы [6] отмечает, что в решение задач оптимизации, касающихся исследования неподвижного объекта индукционного нагрева, внесли вклад А. В. Нетушил, М. Б. Коломейцева, С. А. Панасенко, Н. Е. Разоренов, А. Е. Слухоцкий, Н. А. Павлов. Анализ и синтез систем автоматического управления объектом индукционного нагрева изложены в работах Н. И. Асцатурова, Н. Е. Разоренова, Д. А. Гитгарца, А. Я. Уклейна, А. В. Бамунэра, А. Д. Свенчанского и др. Основы теории автоматического управления, в частности анализ устойчивости и качества систем, изложены в книгах В. А. Бесекерского, А. А. Воронова, В. В. Солодовникова и др.

В работе [7] отмечено, что большой вклад в развитие теории и техники индукционного нагрева внесли В. П. Вологдин, А. В. Донской, А. С. Васильев, В. А. Бодажков, А. Н. Шамов, М. С. Немков, К. З. Шепеляковский, И. Н. Кидин, А. Б. Кувалдин, А. М. Вайнберг, В. С. Чередниченко, С. В. Дресвин, В. Б. Демидович, Т. С. Зимин и др. Впервые провели аналитические расчеты индукционного нагрева с учетом упругих термонапряжений Г. И. Бабат и М. Н. Родигин в 1950 г. В 70-х годах в работах С. А. Яицкова, Ю. И. Сосинова, П. М. Чайкина, А. Э. Эрмана, М. Я. Смелянского и в 90-х годах в работах Н. Д. Морозкина рассматривались процессы индукционного нагрева с учетом упругих термических напряжений в цилиндрических изделиях. В работах А. С. Васильева, В. Б. Демидови-

ча, В. В. Царевского также учитывались термонапряжения. В конце 80-х и начале 90-х годов были проведены расчеты процессов индукционного нагрева и термонапряжений в цилиндрических заготовках с использованием численных методов в работах Р. П. Хичке и В. Андре технического университета Ильменау (Германия). В данных работах не проводились исследования режимов нагрева и не даются какие-либо практические рекомендации по ограничению скорости индукционного нагрева с учетом термонапряжений. В начале 90-х годов в работе Э. Я. Рапопорта рассмотрены вопросы управления индукционным нагревом изделий с учетом упругих термонапряжений. При решении указанных задач мощности и длительности стадий нагрева, температуры и термонапряжения в изделиях оценивались приближенно без учета теплового и термонапряженного состояния кромок прямоугольного сечения. В рассматриваемой работе также отмечается, что в настоящее время для увеличения производительности, которая приводит к повышенным значениям термических напряжений, применяется скоростной индукционный нагрев (СИН). При применении СИН, в первую очередь, при ускоренном изотермическом нагреве под обработку давлением или при нагреве под поверхностную закалку, особо важно учитывать термические напряжения, возникающие в изделиях из-за больших температурных перепадов, поскольку в ускорении индукционного нагрева основным фактором являются перепады температур в изделии. В связи с этим технологи должны четко представлять специфику индукционного нагрева, иметь представление о характере температурных полей в изделиях при различных скоростях нагрева.

Автором работы [8] отмечено, что при промышленном освоении специализированных высокоскоростных индукционных установок (производительностью от 5 до 8 т/ч) в составе автоматических линий для обеспечения нагрева заготовок до температуры 1250 °С перед обработкой давлением сокращение их габаритных размеров с обеспечением основных энергетических параметров является первостепенной задачей. Для этого может быть применена схема СИН, требующая непрерывной подачи заготовок через нагревательные блоки. В рассмотренной работе проанализировано также применение индукционного нагрева в металлургической промышленности, в частности, использование индукционных проходных нагревателей для нагрева трубных заготовок перед редуцированием и калибровкой. В работе отмечено, что по сравнению с газовыми печами они имеют следующие преимущества: в 5–6 раз меньшие габари-

ты по длине (что упрощает их установку в линии агрегата); высокая надежность; постоянная готовность к работе и оперативность; почти полное отсутствие окалины; легкость автоматизации поддержания и изменения режима нагрева и его согласования с режимами работы редуцированного стана и агрегатами, расположенными до нагревателя. Автор также затронул вопросы термической обработки сортового проката, в свою очередь, которая при нагреве индукционным способом оказалась значительно эффективнее по сравнению с термообработкой в пламенных и электрических печах. При этом также используются проходные нагреватели. За рубежом наряду с выпуском серийных индукционных нагревателей большее значение приобрела разработка установок большой мощности индивидуального назначения. Требования к проектированию таких установок повышаются, так как возможностей доводки или исправления ошибок в последующих экземплярах здесь нет. По мнению автора, проведение же полномасштабных натуральных экспериментов с целью получения информации, облегчающей проектирование, затруднительно и экономически невыгодно. В этих условиях качественное проектирование проходных индукционных нагревателей возможно только при использовании более точных математических моделей процессов нагрева и при проведении его с помощью САПР КИН.

В работах [9, 10] рассмотрен ряд дополнительных возможных применений в металлургической промышленности. В настоящей работе отмечено, что внедрение технологических процессов непрерывной разливки с последующей прокаткой, непрерывной термообработки и покрытия ленты защитными материалами, термообработки труб, штамповки сплавов в твердотельном состоянии методом тиксоформовки привели к острой потребности в высокоэффективных индукционных установках с контролируемым прецизионным нагревом металла. Компактные, практически без тепловой инерции и всегда готовые к работе индукционные нагреватели идеально вписываются в непрерывные автоматизированные линии. В настоящее время области потенциального использования индукционного нагрева в металлургической промышленности чрезвычайно велики. Нагрев толстых слябов перед прокаткой может осуществляться от температуры окружающей среды до температуры прокатки. Как было отмечено ранее, наиболее экономически выгодный подход, снижающий стоимость нагрева тонны металла при существенном уменьшении окалинообразования и обезуглероживания, заключается в нагреве ме-

талла после выхода из газовой печи (900–1150 °С) до температуры прокатки (1150–1250 °С). В свою очередь, развитие технологии непрерывной разливки-непрерывной прокатки позволяет исключить зону хранения слябов и повторного их нагрева, что делает эту технологию энергосберегающей и существенно снижающей материальные затраты на производство тонны проката. Возможным согласующим звеном между установкой непрерывной разливки и прокатным станом может быть индукционный нагреватель, который позволяет гибко и оперативно корректировать и формировать температурное поле сляба, обеспечивая максимальную производительность стана и, главное, высокое качество прокатки.

В работах также отмечено, что роль индукционного нагрева возрастает при использовании его в современных новейших линиях разливки тонких слябов с толщиной 20–50 мм. Чрезвычайно эффективно применение индукционного нагрева для подгрева кромок тонких слябов или полосы подката на промежуточных рольгангах между черновыми и чистовыми клетями прокатного стана. Производство листового проката с покрытием повышенной стойкости против коррозии, улучшенными свойствами свариваемости, окрашиваемости, пылезащищенности значительно возросло во всем мире, что объясняется постоянным увеличением спроса автомобильной промышленности в данной продукции. Индукционный способ нагрева тонколистовых ферромагнитных материалов является одним из самых перспективных для применения в линиях непрерывного отжига, горячего цинкования и др. Значительное распространение индукционный нагрев получил в трубном производстве. Автор рассматриваемых работ обобщенно выделяет три главные группы индукционных нагревателей, которые используются в металлургической промышленности: индукционные нагреватели блюмов, слябов и полос; индукционные нагреватели лент; индукционные нагреватели цилиндрических заготовок, включая трубные заготовки. Однако отмечается, что с энергетической точки зрения трудно ожидать до последней трети XXI века полную замену в металлургическом производстве газового нагрева индукционным. Но при этом в очередной раз отмечается, что перспективно комбинированное использование газового и индукционного нагрева.

В свою очередь увеличение производительности индукционных нагревателей и уменьшение их габаритных размеров расширяет сферу их применения как в машиностроении, так и в металлургии. Так, в работе [11] отмечено, что компактность

индукционных нагревателей позволяет размещать их непосредственно там, где требуется нагрев, тем самым, исключая потери тепла при транспортировке нагреваемого изделия к деформирующему оборудованию. В то же время разнообразие форм индукционных нагревателей, которые могут быть использованы для технической реализации одной и той же задачи, приводит к необходимости решения ряда специфических проблем. Выбор конструктивного исполнения диктуется требованиями, предъявляемыми к нагревателю конкретным технологическим процессом, условиями работы, уровнем ра-

бочих температур, производительностью, энергоэффективностью и т. д. Кроме того, при проектировании новой конструкции индукционного нагревателя необходимо учитывать большое количество факторов, от которых зависят его эксплуатационные качества. По мнению автора, применение известных инженерных методик расчета индукционных нагревателей цилиндрических заготовок в продольном магнитном поле для решения поставленной задачи не представляется возможным. Для этого необходимо выполнять более сложные численные расчеты с учетом вышеперечисленной специфики.

Литература

1. Гурченко П. С. Основные направления переоснащения термического производства РУП «МАЗ» / П. С. Гурченко, А. И. Михлюк, А. Д. Волков // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 ноября 2008 г. / Минский автомобильный завод; под общ. ред. П. С. Гурченко. Минск, 2008. С. 12–18.
2. Астапчик С. А. Состояние и перспективы развития индукционного нагрева на промышленных предприятиях Республики Беларусь / С. А. Астапчик [и др.] // Теория и практика энергосберегающих термических процессов в машиностроении: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 ноября 2008 г. / Минский автомобильный завод; под общ. ред. П. С. Гурченко. Минск, 2008. С. 26–31.
3. Баранов А. Н. Индукционный нагрев заготовок под горячую штамповку / А. Н. Баранов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2004. № 6. С. 34–37.
4. Кудрин Н. А. Нагрев кузнечных заготовок в пламенно-индукционной установке / Н. А. Кудрин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. 1970. № 4. С. 39–42.
5. Афиногентов А. А. Моделирование и оптимальное управление технологическим комплексом «нагрев – обработка металла давлением»: Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2008.
6. Гун М. Н. Система автоматического управления технологическим процессом нагрева стальной проволоки и ленты при закалке в непрерывном конвейерном режиме: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2008.
7. Лепешкин А. Р. Разработка эффективных режимов скоростного индукционного нагрева изделий с учетом термических напряжений: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007.
8. Казьмин В. Е. Разработка математических моделей проходных индукционных нагревателей и их использование для автоматизированного проектирования: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984.
9. Демидович В. Б. Теория, исследование и разработка индукционных нагревателей для металлургической промышленности: Дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2002.
10. Демидович В. Б. Применение индукционного нагрева в металлургическом производстве / В. Б. Демидович // Электromеталлургия, 2006. № 4. С. 20–23.
11. Никитина Е. А. Исследование и разработка трехфазного индуктора для нагрева цилиндрических заготовок в поперечном магнитном поле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2011.