

УДК 669.71

ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОД ДЕФОРМАЦИЮ

Л.С. Зимин, А.С. Егиазарян

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: epp@samgtu.ru

Рассмотрены особенности проектирования и эксплуатации систем индукционного нагрева металла под обработку давлением. Основное внимание уделено применению индукционного нагрева в прокатном и прессовом производствах. Показаны особенности проектирования и эксплуатации индукторов на промышленной частоте как в однофазном, так и в трехфазном исполнении. Дан анализ распределения активной мощности по длине трехфазного индуктора. Раскрываются основные причины, ухудшающие равномерность нагрева заготовок. Освещены вопросы электромагнитной совместимости мощных индукционных установок с системой электропитания.

Ключевые слова: индуктор, проектирование, краевые эффекты, равномерность нагрева, энергоэффективность.

Широко распространенные в различных отраслях промышленности процессы обработки металлов методом горячего пластического деформирования неразрывно связаны с технологией нагрева металла, где перспективно применение индукционного нагрева [1].

В условиях дефицита электроэнергии, ее высокой стоимости при одновременном росте удельных мощностей нагрева актуальное значение приобретает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металла давлением (ОМД)» [2–5; 7].

В общем случае методика проектирования ИНУ индифферентна к виду ОМД, но для получения конкретных результатов необходим дифференцированный подход. Это связано в основном с особенностями конструкции зоны обработки давлением (очага деформации), которые отражаются в тепловом балансе деформируемого металла. Если с точки зрения конструкции ИНУ и особенностей процесса индукционного нагрева ограничиться двумя основными формами нагреваемых заготовок – прямоугольной и цилиндрической, то из наиболее распространенных видов горячей ОМД в металлургическом производстве целесообразно рассмотреть прокатку (слябинг) и прессование. В частности, рассматривается прессование алюминиевых сплавов и прокатка листов (слябинг) [6]. Выбор оптимальной величины температуры является одним из наиболее важных условий при построении технологии, оказывающим влияние на основные технические и экономические показатели.

В общем случае температура заготовки взаимосвязана с рядом других технологических параметров и изменяется в процессе деформации. При этом следу-

*Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор.
Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент.*

ет учитывать, что уже при нагреве создается неравномерность температурного поля по сечению и длине заготовки, которая при деформации усиливается. Это происходит потому, что в пластической зоне около 90–95 % приложенной энергии деформации переходит в тепло; тепло образуется также и в объемах металла, прилегающих к контактными поверхностям, вследствие затраты энергии на преодоление сил контактного трения.

Процесс деформационного теплообразования иногда весьма существенно изменяет первоначально заданный температурный режим. Изменение температурных условий в течение процесса может влиять непосредственно на физико-химическое состояние металла, величину и характер распределения прочностных и пластических свойств его в пластической зоне и, следовательно, на силовые и скоростные условия процесса, механические характеристики и ряд других свойств и характеристик.

На основании энергетического условия пластичности Мизеса – Губера количество энергии формоизменения при необратимой деформации при заданной температуре, величине и скорости деформации не зависит от величины и скорости деформации и равно

$$W = k_{\sigma} G \ln \lambda, \quad (1)$$

где k_{σ} – сопротивление металла деформированию;
 G – объем обрабатываемой заготовки;
 λ – вытяжка.

Сопротивление металла деформированию, определяющее тепловой эффект деформации, а также величину усилий и производительность ОМД, в свою очередь, зависит от температуры, степени деформации (v) и скорости деформации (v). Строго говоря, влияние всех условий деформации на сопротивление деформации взаимосвязано, но в первом приближении их можно представить с помощью обособленных термодинамических коэффициентов

$$k_{\sigma} = k_{\sigma 0} k_t k_v, \quad (2)$$

где $k_{\sigma 0}$ – основное (базовое) сопротивление деформации при $k_t = k_v = 1$.

На основе анализа литературных источников получена линейная аппроксимация термодинамических коэффициентов:

$$k_v = 1 + \beta_v (v - 0,3);$$

$$k_v = 1 + \beta_y \ln y; \quad (3)$$

$$k_t = 1 + \beta_t (t_{cp} - 400 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что общим для всех металлов является снижение k_t с повышением температуры по экспоненте, весьма близкой к прямой. Известно, что сопротивление деформации уменьшается с повышением температуры начала прокатки практически линейно. При горячем деформировании, которое протекает при температурно-скоростных условиях, когда рекристаллизация металла успевает осуществляться полностью, а упрочнение практически отсутствует, можно исходя из анализа литературных источников принять $k_v = 1,0$. Доля диссипации энергии деформации (1) в тепловую составляет при прессовании: 0,96–0,98 (сталь), 0,87 (алюминий); при прокатке: 0,84–0,94 (сталь), 0,77–0,93 (алюминий). Как видно, выделение тепловой энергии для рассматриваемых видов ОМД практически одинаково и температура в зоне деформации в основном определяется условиями отвода тепла.

Выбор оптимальной величины температуры является одним из наиболее важных условий при построении технологии, оказывающим влияние на основные технические и экономические показатели. В общем случае температура заготовки взаимосвязана с рядом других технологических параметров и изменяется в процессе деформации. При этом следует учитывать, что уже при нагреве создается неравномерность температурного поля по сечению и длине заготовки, которая при прессовании усиливается. Это происходит потому, что в пластической зоне около 90–95 % приложенной энергии деформации переходит в тепло; тепло образуется также и в объемах металла, прилегающих к контактным поверхностям, вследствие затраты энергии на преодоление сил контактного трения.

При современном состоянии производства производительность прессового оборудования достигает 4–5 т/час на прессах средней мощности, 10–15 т/час на крупных прессах, а производительность современных крупных прокатных станов достигает 50 и более т/час.

Из приведенных цифр видно, что даже современные электрические печи сопротивления с принудительной циркуляцией не в состоянии достичь указанной производительности и что для обеспечения нормальной работы крупного оборудования приходится устанавливать до 4–5 многокамерных крупногабаритных нагревательных печей сопротивления.

Исследования нагрева алюминиевых слитков показали, что пределом увеличения скорости нагрева является внутренний температурный перепад по сечению слитка (Δt). Для твердых алюминиевых сплавов рекомендуется температурный перепад не более 20 °С, для мягких $\Delta t = 40$ °С и для чистого алюминия $\Delta t = 60$ –80 °С и более.

Повышение скорости нагрева в несколько десятков раз стало возможным только при индукционном нагреве, когда вся энергия, идущая на нагрев, передается индукционно, непосредственно в слитки без участия внешней среды.

Индукционный нагрев токами промышленной частоты позволил в 30–40 раз повысить скорость нагрева и уменьшить емкость печи до 3–4 слитков и менее.

Такое уменьшение рабочего пространства печи позволило снизить мощность холостого хода индукционной печи мощностью 600–800 кВт до 10–15 кВт, повысить КПД индуктора до 0,65 и сделать его практически независимым от производительности печи, что недостижимо в электрических печах сопротивления.

Индукционный нагрев характеризуется значительными значениями удельной мощности – 100–300 кВт/м² (при нагреве в печах сопротивления 6–10 кВт/м²), что приводит к большим перепадам по объему заготовки. Перепад температуры между поверхностью и центром заготовки для цветных металлов, предназначенных для прессования, составляет 3–5 % от температуры нагрева. Допустимым перепадом по сечению для алюминиевых сплавов по условиям прессования считается 40 °С, а по условиям внутренних термических напряжений эту величину можно увеличить до 100 °С и выше с последующим уменьшением до 40 °С в процессе выравнивания.

При прокатке скорость деформирования технологическими факторами практически не ограничивается. Это объясняется сравнительно небольшими частными деформациями и незначительным скольжением металла по контактной поверхности валков, при которых происходят лишь небольшие выделения тепла деформации и трения, исключающие возможность повышения температуры металла в пластической зоне до интервала с пониженной вязкостью.

Таким образом, при прокатке в первом приближении можно не рассматри-

вать температурное поле в процессе деформации, ограничившись средней температурой заготовки (сляба).

Уравнение теплового баланса при прокатке можно представить в виде

$$\Delta t = \Delta t_d - \Delta t_{из} - \Delta t_{ох}, \quad (4)$$

где Δt_d – приращение температуры за счет деформации;

$\Delta t_{из}$, $\Delta t_{ох}$ – охлаждение за счет теплоизлучения и теплоотдачи прокатным валкам, охлаждающей воде (эмульсии) и деталям стана.

Анализ выражения (4) и статистические данные показывают, что при прокатке наблюдается лишь незначительное изменение температуры в сторону снижения, которое для стального и алюминиевого раската не превышает 10 % от начальной температуры заготовки.

Таким образом, при прокатке в первом приближении можно не рассматривать температурное поле в процессе деформации, ограничившись средней температурой заготовки (сляба), связь которой с производительностью и основными энергетическими и технологическими параметрами прокатки можно установить следующим образом.

Момент прокатки

$$M_{пр} = K_{ср} B R \Delta h, \quad K_{ср} = K_{пр} K_{\sigma}, \quad (5)$$

где B – ширина сляба; R – радиус рабочих валков; Δh – величина обжатия;

$K_{пр}$ – зависит от формы и геометрии раската в очаге деформации, от условий деформации и трения, а также от напряженного состояния в очаге деформации; его величина обратна КПД деформации $\eta_{деф} = 0,5 - 0,9$.

Мощность прокатного двигателя

$$P_{дв} = M_{пр} \omega / \eta_{ст} = \frac{K_{ср} V}{\eta_{см} \tau} \ln \lambda, \quad \lambda = H/h, \quad (6)$$

где H , h – толщина сляба (раската) до и после прокатки;

ω – частота вращения валков стана, равная частоте вращения прокатного двигателя в безредукторном приводе (при наличии лишь шестеренчатой клетки);

$\eta_{ст}$ – КПД стана, определяемый КПД привода и подшипников:

$$\eta_{с} = \eta_{пр} \eta_{под} = (0,63-0,72) \cdot (0,75-0,97);$$

τ – время деформации.

Время прокатки сляба за n пропусков в одной клетке будет равно

$$\tau_{пр} = AK_t + \tau_n, \quad A = \frac{K_{\sigma 0} \sum_{i=1}^n K_{vi} k_{yi} \ln \lambda_i}{P_{дв} \gamma \eta_{сн} \eta_{та}}, \quad v = \frac{\Delta h}{H}, \quad y = \omega \sqrt{\frac{R}{H}} v, \quad (7)$$

где τ_n – суммарное время пауз при прокатке одного сляба, определяемое работой рольганга, нажимного механизма, манипулятора и т. п.;

γ – удельный вес прокатываемого металла.

Выражение (7) дает простейшую зависимость времени прокатки от температуры через коэффициент K_t . Величины, входящие в коэффициент A , могут быть взяты из паспортных данных прокатного стана, а также из следующих рекомендаций.

Требуемое качество проката достигается при соотношении $R/H = 3-4$; по условию захвата металла валками величина $vR/H \leq (0,12 - 0,2)$.

Согласно системному подходу при проектировании ИНУ в технологиях прокатки необходимо учитывать взаимодействие прокатываемого металла с прокатным станом, рольгангами и нажимными механизмами.

Конкретные задачи из любой области теории ОМД необходимо рассматривать в системе взаимосвязанных проблем. Так, решение какой-либо изолированной задачи в системе, в которую она входит, может оказаться неэффективным в широком и более полном понимании этого слова. Так, например, время паузы – это наибольшее из времен работы механизмов перед собственно прокаткой. Но это не значит, что более быстроходные механизмы, кроме одного самого тихоходного, должны работать наискорейшим образом. Правильнее потребовать от них оптимальной работы с точки зрения минимума расхода энергии при выполнении операций за время срабатывания самого тихоходного механизма. Вряд ли целесообразно требовать от прокатного стана максимальной производительности, если он в технологической цепочке не является узким местом.

Действительно энергоэффективный технологический комплекс «ИНУ – деформация», особенно для мощных ИНУ и крупногабаритных заготовок обрабатываемого металла, можно спроектировать только с учетом его системы электропитания (СЭС).

В данном случае акцент делается на электроснабжение мощных нагревательных комплексов прокатных и прессовых производств для обработки крупногабаритных заготовок, когда ИНУ выполняют на частоту 50 Гц.

Применяя промышленную частоту, целесообразно попользоваться ее основным энергетическим достоинством – наличием трех фаз. Нагрев в трехфазном индукторе создает дополнительные перепады по длине за счет неравномерной эпюры напряженности магнитного поля.

С увеличением веса заготовок и производительности индукционных нагревателей промышленной частоты мощность однофазных индукторов, даже при условии компенсации их реактивности, часто оказывается довольно значительной. При этом их подключение к трехфазным сетям становится нежелательным или вообще недопустимым. Поэтому индукционные установки большой мощности целесообразно выполнять в трехфазном исполнении.

В трехфазных электрических машинах все фазы расположены симметрично, т. е. имеют равные значения взаимных индуктивностей. При симметричной системе напряжений получается полностью симметричная система тока, поэтому бывает достаточно исследовать процессы только в одной фазе, чтобы получить представление о соотношениях в трехфазной системе. Из-за соосного расположения катушек индуктора возникает пространственная асимметрия, являющаяся причиной неравенства коэффициентов взаимной индуктивности даже в том случае, если все три катушки индуктора имеют одинаковые параметры.

Поскольку коэффициенты взаимной индукции между индукторами не равны между собой, то, как следствие, не будет равенства и в потреблении активной мощности каждой фазой. В зависимости от значений коэффициентов взаимной индуктивности и от углов сдвига между токами в каждом индукторе потребление мощности каждым из индукторов может быть различным, а также положительным или отрицательным, так как одиночные индукторы могут обмениваться мощностью как с сетью, так и друг с другом.

Как правило, при углах сдвига между токами, близкими к 120° , мощности

крайних катушек в сумме дают удвоенное значение мощности средней катушки. При углах, отличающихся от 120° , значения мощностей в каждой фазе могут быть различными.

Неравномерное потребление мощности разными катушками не означает такого же неравномерного распределения напряженности магнитного поля и, как следствие, неравномерного нагрева. Таким образом, потребление мощности отдельными катушками не находится в однозначной связи с индуктированной в заготовке мощностью и с мощностью, превращенной в тепло в катушке. Потребление мощности тремя отдельными катушками трехфазного индуктора неодинаково даже при одинаковом конструктивном их исполнении и одинаковой загрузке. Однако установлено, что потребление мощности отдельными катушками не находится в однозначной связи с индуктированной в заготовке мощностью, т. е. равномерный нагрев под каждой катушкой возможен. Чем больше отношение диаметра катушек к длине, тем сильнее сказывается их взаимное индуктивное влияние на электрический режим индуктора.

В то же время в этом случае необходимо стремиться к равномерной загрузке всех фаз сети электроснабжения. Существуют два возможных пути: первый – создавать однофазные установки, кратные числу фаз, и в ходе эксплуатации четким графиком работы обеспечивать их равномерную загрузку; второй – использовать установки, питающиеся одновременно от трех фаз при соединении катушек индукторов в звезду, треугольник или открытый треугольник.

В условиях современного производства если не применять симметрирующие устройства, то реальным является второй путь.

Надо отметить, что у трехфазного индуктора к краевому эффекту катушек добавляется влияние стыков соседних фаз, которое тем больше, чем более сдвиг фаз полей соприкасающихся катушек. При таком рассмотрении однофазная катушка представляет собой идеальный граничный случай отдельных катушек, поля которых имеют одинаковую фазу. Такая катушка будет иметь наивысший КПД. Для трехфазного индуктора эта одинаковость фаз недостижима. Однако и в этом случае надо стремиться к возможному выравниванию фаз по времени, т. е. и по соображениям к.п.д. предпочтение следует отдать несимметричной схеме включения катушек индуктора.

Следует также обратить внимание на то, что эффективное сопротивление обмотки индуктора зависит от формы поля. Вытеснение тока в обмотке происходит в сторону магнитных силовых линий. На концах катушек могут возникать дополнительные потери от вытеснения тока за счет радиальной составляющей магнитного поля. Деформация поля на стыках зависит от сдвига фаз, так что и по этой причине следует стремиться к несимметричной схеме включения катушек.

Таким образом, однофазный индуктор имеет наивысший достижимый КПД. Но с помощью трехфазного индуктора легко достигается симметрирование нагрузки.

Под энергоэффективным проектированием СЭС комплекса ИНУ понимается построение наиболее экономичного ее варианта при соблюдении технических условий, накладываемых как элементами СЭС, так и потребителями – ИНУ. В качестве экономического критерия энергоэффективности целесообразно принимать суммарные приведенные затраты на СЭС, которые определяются технологическими, электротехническими и топологическими параметрами. К технологическим параметрам относятся: технологическая схема процесса «ИНУ – деформация» с указанием режимов работы, количества и мощности ИНУ, частота тока,

требования к надежности электроснабжения и регулированию мощности. К электротехническим параметрам относятся: напряжение и число фаз, количество и мощность источников питания, компенсирующих устройств, конструктивное исполнение сети; к топологическим: координаты расположения ИНУ, источников питания, компенсирующих устройств, а также конфигурация сети.

Участок индукционных нагревательных установок (ИНУ), предназначенных для ОМД, можно условно представить в виде двух транспортных потоков: 1 – металл, 2 – электроэнергия. В глобальной постановке задачи оптимизации электротермического производства это задача комплексной оптимизации потоков 1 и 2 с целью получения максимума дохода при условии выполнения заданной программы в срок и с заданным качеством. Указанная задача ставится в многокритериальной форме:

$$I(X) = [I_k(X), \dots, I_n(X)] \rightarrow \max; \quad (8)$$

$$X \subset \Omega; \Omega: h_i(X) \geq 0; (i = 1, \dots, m).$$

Здесь $I_k(X)$ – критерии, определяющие величину дохода (капитальные и текущие затраты, надежность и гибкость энерготехнологического комплекса, стабильность экономических показателей и способность комплекса к развитию);

$h_i(X)$ – ограничения (производительность и качество производства, финансовые и материальные ресурсы, экологические нормы и требования охраны труда, ограничения на площади, социальные факторы), которые определяют границы области Ω возможных проектных решений X , представляющих собой вектор параметров ИНУ, режимы их работы, а также характеристики системы электроснабжения электротермического участка – координаты трансформаторных подстанций (ТП) и узлов токопроводящей схемы, мощность и количество ТП, сечение проводов, количество и схему расстановки источников питания ИНУ.

В качестве уравнений связи в (8) используются уравнения, описывающие электротепловые процессы в транспортных потоках 1 и 2. На стадии проектирования комплексов «нагрев – деформация» и в процессе оперативного управления ими приходится многократно решать задачи (8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Зимин Л.С. Основы промышленных электротехнологий. – Самара: СамГТУ, 2014. – 239 с.
2. Егиазарян А.С. Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 194-198.
3. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63-67.
4. Зимин Л.С., Головачев А.Л., Егиазарян А.С. Оптимальные технологии «индукционный нагрев – деформация» // Вопросы электротехнологии. Научно-технический журнал Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 2(3). – С. 5-10.
5. Рапопорт Э.Я., Плишвицева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
6. Немков В.С., Демидович В.Б., Растворова И.И., Ситько П.А. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: состояние и перспективы // Электрометаллургия. – 2013. – № 2. – С. 12-21.
7. Демидович В.Б., Растворова И.И., Чмиленко Ф.В., Григорьев Е.А., Немков В.С. Энергоэффективные индукционные нагреватели слитков из легких сплавов // РАН. Энергетика. – 2013. – №5. – С. 11-20.

Статья поступила в редакцию 1 июня 2015 г.

FEATURES OF INDUCTION HEATING FOR THE DEFORMATION

L.S. Zimin, A.S. Yeghiazaryan

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Considered the features of design and operation of the induction heating systems of metal treatment under pressure. Focuses on the application of induction heating to rolling and pressing in the industries. Particularity of the design and operation of the inductors at industrial frequency in single-phase and three-phase version was shown. Was made the analysis of distribution of active power along the length of the three-phase inductor. Describes the main causes of deteriorating the uniformity of heating of billets. Highlights the issues of electro-magnetic compatibility powerful induction units with electricity supply system.

Keywords: *inductor, design, edge effects, uniformity heating, energy efficiency.*