

Индукционная наплавка металла как технология аддитивного производства

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Выполнен анализ состояния существующих методов аддитивного производства. На основе выявленных недостатков предложено использовать технологию индукционной наплавки для получения твердотельных изделий.

Применение технологии индукционной наплавки в аддитивном производстве позволит повысить производительность процесса, увеличить прочность и исключить последующую механообработку получаемых изделий. Приведены основные параметры индукционного нагрева.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, аддитивное производство, дозированная наплавка.

1. Актуальность проблемы

Научно-технический прогресс на рубеже XX-XI вв. неразрывно связан с развитием и широким внедрением высоких технологий, обеспечивающих, с одной стороны, получение новых материалов и изделий, а с другой – снижение энерго- и ресурсозатрат с одновременным повышением показателей, связанных с экологичностью производства [1,2].

Постоянно возрастающие требования к надежности систем ЛА при экстремальных условиях эксплуатации, рост требований к точности и стабильности функционирования агрегатов и соответствующих систем во взаимосвязанных автоматических режимах стимулируют разработку новых технологий, в том числе поиск и создание процессов изготовления прецизионных деталей и агрегатов без последующего применения механической обработки.

В настоящее время уже разработаны и широко используются такие технологии – технологии аддитивного производства, позволяющие изготавливать детали на основе компьютерной модели без использования формообразующих элементов и механообработки и относящиеся к стратегическим направлениям развития машиностроения и авиастроения. В настоящее время в мире разработаны и совершенствуются два основных принципа получения объемных деталей:

- SLM (Selective Laser Melting) – выборочное лазерное спекание порошков. Наплавка осуществляется послойно по предварительно нанесенному порошку в соответствии с заданным контуром обхода. Позволяет получать высокую точность изделий, но обеспечивает крайне низкую производительность;
- LMD (Laser Metal Deposition) – прямое наращивание деталей с помощью лазерной коаксиальной наплавки. Обеспечивает высокую производительность процесса, однако для достижения точности и расширения технологических возможностей требуются значительные ресурсы по проектированию трехмерной траектории обработки.

В целом существующие методы создания трехмерных деталей и методы наплавки имеют ряд недостатков, таких, как низкая прочность, низкая производительность, дороговизна оборудования и сложность управления

процессом. Дозированную наплавку как таковую не используют для создания полноценных трехмерных изделий.

Предлагается использовать технологию индукционного нагрева для осуществления процесса дозированной наплавки с последующим применением в аддитивном производстве.

2. Физические основы индукционного нагрева металлов

При прохождении переменного тока по проводнику, около него создаётся переменное электромагнитное поле. В куске металла, помещенном в этом поле, индуцируются токи, частота которых совпадает с частотой первичного тока. Прохождение индуцированного электрического тока вызывает нагрев металла.

Этот способ нагрева металла называется индукционным, а проводник, по которому пропускается электрический ток, – индуктирующим проводником (проводом).

В промышленности широко применяют технологию сквозного индукционного нагрева для решения задач пластической деформации. Ее используют в процессах объёмной штамповки,ковки, прокатки, прессования и волочения. При этом нагреву можно подвергать стали разных типов: от углеродистых до легированных, а также сплавы титана, алюминия, меди и других металлов.

В общем случае целью нагрева является получение заданной температуры с определённой допустимой неравномерностью по объёму изделия. Время нагрева и удельную мощность определяют из условия достижения требуемого распределения температуры [3].

Установки индукционного нагрева имеют сравнительно высокий КПД, поскольку теплота выделяется в самом нагреваемом изделии без использования какого-либо теплоносителя, что приводит к высоким скоростям нагрева и производительности.

Путем подбора частоты для определенного диаметра детали в зависимости от решаемой задачи можно добиться прогрева только поверхностного слоя требуемой глубины либо более глубокого – глубинного прогрева.

Глубинным называют нагрев, происходящий путем выделения теплоты в слое достаточной толщины по сечению детали при отсутствии большого перепада температуры между поверхностью и слоем определенной толщины.

Для нагревательных индукционных установок частоту необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить глубинный тип нагрева, при котором наблюдается меньший перегрев поверхности заготовок и более высокий КПД по сравнению с поверхностным нагревом.

Нагрев считают глубинным, если эквивалентная глубина проникновения ($\Delta_{\text{э,гор}}$) составляет не менее 0,25-0,45 радиуса нагреваемой заготовки r_0 .

3. Расчет основных параметров индуктора для плавления электродной проволоки

Выбор основных размеров индуктора

При расчете индуктора важное значение приобретает точное определение его КПД. Полный КПД индуктора состоит из суммы теплового и электрического КПД и рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{и}} = \eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{т}}, \quad (1)$$

где: $\eta_{\text{т}}$ – тепловой КПД индуктора;

$\eta_э$ – электрический КПД индуктора.

С увеличением зазора между индуктором и заготовкой величина $\eta_э$ уменьшается, а $\eta_т$ – увеличивается, при условии заполнения зазора тепловой изоляцией. Максимальное значение полного КПД достигается при соотношении

$$d_1 = (0,015...0,02) + d_2, \quad (2)$$

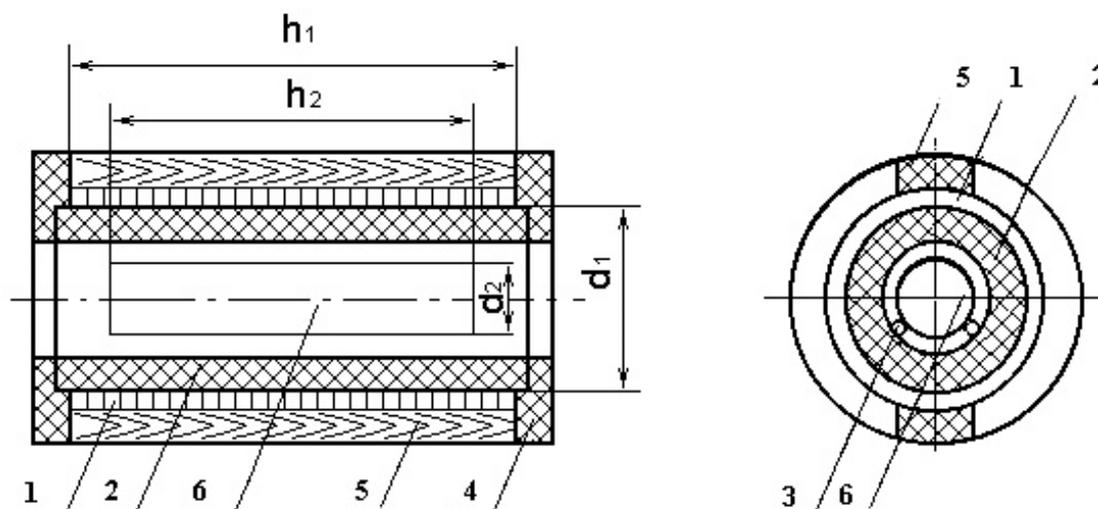
где: d_1 – внутренний диаметр индуктора;
 d_2 – диаметр заготовки.

Это соотношение обеспечивает величину термического КПД в пределах 90...96 %. Длину индуктора определяют из условия необходимости равномерного нагрева по всей длине заготовки, поскольку магнитное поле на торцах индуктора искажается, что вызывает изменение температуры нагрева (подстуживание) заготовки:

$$h_1 = h_2 + (1...2)d_1, \quad (3)$$

где: h_1 – длина индуктора;
 h_2 – длина заготовки.

Основные размеры и конструкция индуктора для сквозного нагрева изображены на рисунке



Конструкция индуктора для сквозного нагрева:

- 1 – обмотка индуктора; 2 – шамотная изоляция; 3 – направляющие;
 4 – фасадные асбестовые плиты; 5 – деревянные стягивающие брусья;
 6 – нагреваемая заготовка

Выбор частоты питающего тока

При частоте питающего тока ниже f_0 глубина проникновения тока соизмерима с радиусом заготовки, что обеспечивает равномерный и быстрый нагрев, но пониженное значение КПД. При частоте выше f_0 глубина проникновения тока намного меньше радиуса заготовки. В расчетных условиях КПД близок к предельным величинам, однако при этом увеличиваются неравномерность нагрева по глубине и время прогрева внутренних слоев за счет.

Это обстоятельство приводит к повышению требований к используемому оборудованию и стоимости установки повышенной частоты. Такие условия определяют нижний и верхний пределы частоты питающего тока:

$$\frac{3 \cdot 10^6 \cdot \rho_2}{d_2^2 \cdot \mu_{2r}} < f < \frac{6 \cdot 10^6 \cdot \rho_2}{d_2^2 \cdot \mu_{2r}}, \quad (4)$$

где: ρ_2 – удельное сопротивление нагреваемого металла;

μ_{2r} – относительная магнитная проницаемость;

f – частота питающего тока.

Максимальное значение глубины проникновения тока соответствует максимальному значению ρ_2 и минимальному – μ_{2r} , что характерно для конечной температуры нагрева. Поэтому для сохранения приемлемого значения КПД в качестве расчетного принимают режим при конечной температуре нагрева и подставляют соответствующие значения ρ_2 и μ_{2r} . При нагреве магнитных материалов выше точки Кюри принимают $\mu_{2r} = 1$.

При конечной температуре нагрева ниже точки Кюри учесть величину μ_{2r} можно лишь приблизительно на основе практического опыта.

Оптимальные частоты питающего тока, обоснованные практикой, приведены в табл. 3 и 4 [4] в зависимости от размеров, конечной температуры нагрева и физических свойств нагреваемых деталей.

Обычно при нагреве детали изменение мощности во времени не превышает 30 % от ее максимального значения, что дает основание при расчетах принимать удельную поверхностную мощность постоянной, равной среднему значению. С учетом этого время нагрева детали определяют по формуле

$$\tau_k = 1,98 \cdot 10^4 \cdot d_2^2 \cdot [S(\alpha, 1) - 1,15 \cdot S(\alpha, 0)], \quad (5)$$

где: $S(\alpha, 1), S(\alpha, 0)$ – вспомогательные функции.

При определении τ_k значение функции $S(\alpha, \beta)$ подставляют из табл.

П-2 [4].

Выводы

Анализ современного состояния технологий аддитивного производства показал, что они имеют как достоинства, так и недостатки.

Внедрение индукционной наплавки как технологии аддитивного производства в авиационную промышленность позволит:

- увеличить коэффициент использования материала при изготовлении сложнопрофильных деталей;
- выполнять полые каналы внутри структуры элемента;
- наращивать изделие по кривой;
- избежать пористости, что приведет к повышению прочностных характеристик изделия;
- повысить производительность и точность.

Список литературы

1. Болотов А.В. Электротехнологические установки [Текст] / А.В. Болотов, Т.А. Шепель. – М.: Высш.шк., 1988. – 366 с.
2. Коняев А.Ю. Электромеханические технологические процессы и их место в ряду электротехнологий [Текст] // А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1999. – №4. – С. 120 – 123.
3. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст]: А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
4. Коврижин Б.Н. Расчет индуктора для сквозного нагрева цилиндрических заготовок [Текст]: Методические указания к расчетно-графической работе по специальностям 100400 и 650900 для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения / Б.Н. Коврижин, М.С. Харченко. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 20 с.
5. Установки индукционного нагрева [Текст] / под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергия, 1981 – 325 с.
6. Шамов А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок [Текст] / А.Н. Шамов, В.А. Бодажков. – Л.: Машиностроение, 1974 – 280 с.

Поступила в редакцию 06.03.2017.

Induction Cladding of Metal as Additive Production Technology

The work analyzes the state of existing methods of additive production. Based on the identified shortcomings, it is proposed to use induction welding technology for the production of solid products. The application of induction cladding technology in additive production will increase the productivity of the process, increase the strength and exclude the subsequent machining of the resulting products. The basic parameters of induction heating are given.

Key words: induction heating, inductor, additive production, metered surfacing.

Індукційне наплавлення металу як технологія адитивного виробництва

В роботі виконано аналіз стану існуючих методів адитивного виробництва. На основі виявлених недоліків пропонується використовувати технологію індукційного наплавлення для отримання твердотілих виробів.

Застосування технології індукційного наплавлення в адитивному виробництві підвищить продуктивність процесу, збільшить міцність і виключить подальшу механічну обробку одержуваних виробів. Наведено основні параметри індукційного нагріву.

Ключові слова: індукційний нагрів, індуктор, адитивне виробництво, дозоване наплавлення.

Сведения об авторах:

Гуторова Кристина Владимировна – студентка, каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.