

УДК: 62.67.53

**Ю.В. Єгоров***Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського"***ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКТОРА У ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛА НАГРІВУ У ПРОЦЕСІ FDM ДРУКУ**

*Розглянуто технічну можливість використання індуктора у якості джерела нагріву у процесі FDM друку. Також розглянуто основні конструктивні проблеми що необхідно вирішити для успішного промислового використання. Дана приблизна оцінка потужності блоку живлення необхідного для успішного використання технології.*

*Ключові слова:* 3d друк, індуктор, зварювальна дуга.

**Ю.В. Егоров***Национальный технический университет Украины "КПИ имени Игоря Сикорского"***ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТОРА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА НАГРЕВА В ПРОЦЕССЕ FDM ПЕЧАТИ**

*Рассмотрена техническая возможность использования индуктора в качестве источника нагрева в процессе FDM печати. Также рассмотрены основные конструктивные проблемы которые необходимо решить для успешного промышленного использования. Дана примерная оценка мощности блока питания необходимого для успешного использования технологии.*

*Ключевые слова:* 3d печать, индуктор, сварочная дуга.

**Y. Yehorov***National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute "***POSSIBILITY OF THE USING OF AN INDUCTOR AS A HEAT SOURCE DURING FDM PRINTING EVALUATION**

*Considered technical possibility of using an inductor as a heating source in the FDM printing. Also, considered the basic structural problems that must be solved for the successful industrial use. Given crude estimate of the power supply output power required for a successful use of technology. Considered existing 3D printing technologies used for printing of metals and metal compounds. Considered methods of control equipment protection from high frequency noise induced by electromagnetic field of inductor. Identified mathematical problems decision of which is necessary to provide the stability of the printing process.*

*Key words:* 3d printing, inductor, welding arc

**Постановка проблеми.** У рамках IV-ї науково технічної революції 3d друк набуває дедалі більшого розповсюдження. Існує багато технологій 3d друку, але на даний момент найбільш доступною є технологія пошарового наплавлення (Fused deposition modeling, FDM). Основними перевагами цієї технології є її простота та доступність. Однак FDM друк має ряд серйозних недоліків: відносно низьку деталізацію та обмежена сфера застосування. Оскільки для FDM друку використовують матеріали із температурою плавлення 200-300°C, такі як PLA, ABS, PVA-пластик, нейлон, фото полімери і т.д., основні сфери застосування цієї технології це дизайн, прототипування та виготовлення форм для лиття. Одна з важливих проблем, що стоїть перед конструкторами усього світу, це розробка технології FDM друку металом. Вирішення цієї проблеми дало б змогу значно знизити ціну кінцевих продуктів за рахунок відмови від лиття, а також вдосконалювати вже існуючі інженерні рішення у всіх машинобудівних галузях за рахунок використання геометричних форм, що зараз є недоступні через неможливість виготовлення деталей такої форми.

Наразі існує два типи FDM 3d друку металом. У першому випадку використовуються металомісткі речовини такі як металічні порошки, композитні наноматеріали і т.ін. основним недоліком такого підходу є складність таких матеріалів у виготовленні і їх ціна, що нівелює переваги самої технології FDM друку. Інший підхід використання дуги у якості джерела теплоти для розплавлення металевго дроту, по суті це модернізована технологія дугового наплавлення металів, що являє собою нанесення розплавленого металу на оплавлену металеву поверхню з наступною його кристалізацією для створення шару з заданими властивостями і геометричними параметрами. Наплавлення застосовують для відновлення зношених деталей, а також при виготовленні нових деталей з метою отримання поверхневих шарів, що володіють підвищеними твердістю, зносостійкістю, жароміцних, стійкістю до агресивного впливу кислот та ін... При більшості методів наплавлення, так само як і при зварюванні, утворюється рухлива зварювальний ванна. У головній частині ванни основний метал розплавляється і переміщується з електродним

металом, а в хвостовій частині відбуваються кристалізація розплаву металу. Наплавляти можна шари металу як однакові за складом, структурою та властивостями з металом деталі, так і такі, що значно відрізняються від основи. Метал, що наплавляється, вибирають з урахуванням експлуатаційних вимог і здатності до зварювання. Наплавлення може проводитися на плоскі, циліндричні, конічні, сферичні та інші форми поверхні в один або кілька шарів. Товщина шару наплавлення може змінюватися в широких межах - від часток міліметра до сантиметрів. При наплавленні поверхневих шарів з заданими властивостями, як правило, хімічний склад наплавленого металу істотно відрізняється від хімічного складу основного металу. Тому при наплавленні повинен виконуватися ряд технологічних вимог. В першу чергу такою вимогою є мінімальне розведення спрямованого шару основним металом, розплавляється при накладенні валиків. Недоліки цього підходу це складність контролю процесу друку, наявність фізико-хімічних явищ пов'язаних із реагуванням перегрітого металу із навколишнім середовищем, що значно знижують якість кінцевого продукту та необхідність використання високопотужних джерел живлення для підтримання процесу горіння дуги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематикою 3d друку займається ряд науковців, серед яких Christopher Barnatt, який у своїй роботі розглядає можливості та перспективи розвитку який у своїй роботі «3d printing» розглядає можливості та перспективи розвитку 3d друку, Brian Evans у своїй роботі «Practical 3D Printers» розглядає конструкційні особливості 3d принтерів для різних технологій 3d друку, Dag Lukkassen у своїй роботі «Advanced Materials and Structures and their Fabrication Processes» розглядає особливості різних матеріалів та способи виготовлення моделей з цих матеріалів. Недоліком цих робіт на думку автора є достатньо одноманітний підхід до проблеми 3d друку металом. У всіх цих роботах розглядається лише технології пошарового наплавлення та спікання металевих порошків. Нажаль у них зовсім не розглянута можливість використання альтернативних джерел тепла.

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету - оцінити можливість використання індуктора у якості джерела нагріву металевих дроту у пристрої для FDM 3d друку; визначити напрями для подальших досліджень.

**Викладення основного матеріалу.** Індукційний нагрів металів заснований на двох фізичних законах: законі електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла і законі Джоуля-Ленца. Металеві тіла (заготовки, деталі та ін.) Поміщають в змінне магнітне поле, яке збуджує в них вихрове електричне поле. ЕРС індукції визначається швидкістю зміни магнітного потоку. Під дією ЕРС індукції в тілах протікають вихрові (замкнуті усередині тіл) струми, що виділяють теплоту за законом Джоуля-Ленца. Ця ЕРС створює в металі змінний струм, теплова енергія, що виділяється даними струмами, є причиною нагрівання металу. Індукційний нагрів є прямим і безконтактним. Він дозволяє досягати температури, достатньої для плавлення тугоплавких металів і сплавів. Інтенсивний індукційний нагрів можливий лише в електромагнітних полях високої напруженості і частоти, які створюють спеціальними пристроями - індукторами. Індуктори живлять від мережі 50 Гц (установки промислової частоти) або від індивідуальних джерел живлення - генераторів і перетворювачів середньої і високої частоти. Найпростіший індуктор пристроїв непрямого індукційного нагріву низької частоти - ізольований провідник (витягнутий або згорнутий в спіраль), поміщений всередину металеві труби або накладений на її поверхню. При протіканні по провіднику-індуктора струму в трубі наводяться і гріють її вихрові струми. [2]. У випадку використання індуктора у якості джерела нагріву немає потреби розплавляти металу дроту, достатньо довести його до пластифікованого стану у котрому можлива екструзія через сопло екструдера. Це зумовлює ряд переваг перед методом дугового наплавлення: відсутність розбрикування, відсутність перегрітого металу і, як наслідок, не такі суттєві структурні перетворення у наплавленому металі.

Для того щоб дати оцінку можливості використання індуктора перш за все треба визначитися із його необхідною потужністю.

Приймаємо  $f=4000$  Гц,  $D_2=0,6$  мм,  $a_2=30$  мм,  $T_0=1200-1300^\circ\text{C}$

де

$f$ - Робоча частота

$D_2$ -Діаметр дроту

$a_2$ - Довжина нагрітої частини дроту

$T_0$ - Температура нагріву, оскільки не потребується нагрівати дріт до температури плавлення, а лише до температури при якій метал переходить у пластифікований стан  $T_0$  приймається  $1200-1300^\circ\text{C}$ .

Визначаємо глибину проникнення струму за емпіричною формулою [1]

$\xi$  – глибина шару у якому виділяється головна частина індуктивної енергії визначається з умови

$$\zeta = \Delta_k, \text{ при } \frac{D_z}{\Delta_k} \geq 5 \tag{1}$$

$$\zeta = 0.2D_2, \text{ при } \frac{D}{\Delta_k} < 5 \tag{2}$$

$$\frac{D_2}{\Delta_k} = \frac{0.0006}{0.008} = 0.075 < 5 \tag{3}$$

$$\zeta = 0.2D_2 = 0.2 * 0.6 = 0.12 \text{ мм} \tag{3}$$

Приведений переріз

$$D'_2 = D_2 - \zeta = 0.6 - 0.12 = 0.48 \text{ мм} \tag{4}$$

Час нагріву

$$t_k = K * D'_2 = 2.7 * 0.48 = 1.2 \text{ с} \tag{5}$$

Де К- коефіцієнт що визначає інтенсивність тепловкладення. Значення К вказані у Табл.1.

Таблиця 1.

**Значення коефіцієнту К**

Деталь	$\Delta T$	К при нагріві	
		звичайному	прискореному
Циліндр	100	6	2,5
	150	3,7	
Пластина	100	11,7	5,3
	150	6,9	

Середня корисна потужність індуктора

$$P_t = 840 * \frac{G}{t_k} = 840 * \frac{0.0002}{1.2} = 0.155 \text{ кВт}$$

де G- вага дроту довжиною  $a_2$ . У відповідності до довідкових даних[4]  $G=0,0002$  кг.

Залежність необхідної потужності індуктора від часу нагріву наведено на Рисунку.1

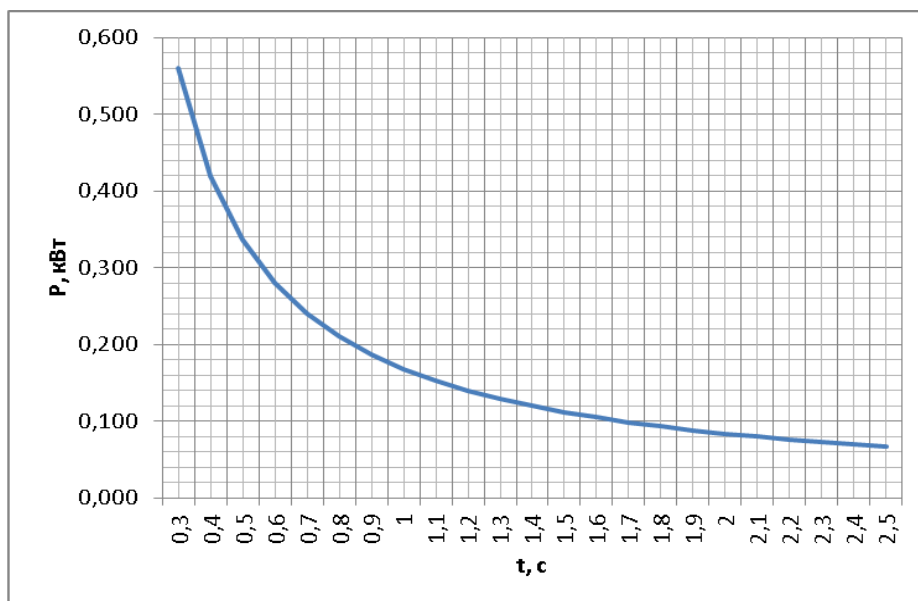


Рис1. – Залежність потужності індуктора від часу нагріву

Як видно із розрахунків процес потребує зовсім невеликої потужності порівняно із джерелом живлення що живить дуговий розряд.

Процесом друку керують за допомогою обладнанням, чутливого до перешкод що можуть спричинятися височастотним електромагнітним полем індуктора. При проектуванні пристроїв для захисту від перешкод необхідно виконати:

- Привести до нуля рівень різниці потенціалів між «нульовим» проводом живлення і заземленням;

- Забезпечити шунтування розв'язок між будь-якими колами заземлення;

- Виробляти радіальне, а не кільцеве підключення шлейфів з навантаженням в кінці лінії;

- Застосовувати екранований провід (наприклад, плетінка ПМЛ) для шлейфів і монтажу пристроїв. Екранування має бути підключене безперервно і з'єднане тільки з модулями приладу, до яких підключаються ці шлейфи. Так само підключається заземлення і самих модулів. Якщо кабель ПМЛ буде підключений в декількох точках, перешкоди тільки збільшаться. Більш того - плетінка ПМЛ сама стане джерелом перешкод. Правильно підключений кабель ПМЛ дасть можливість значно знизити перешкоди;

- Застосовувати екранований провід (за допомогою ПМЛ) для міжмодульних ліній зв'язку;

- Якщо в приладі або поруч з ним використовуються засоби радіозв'язку - відмовитися від використання в пристрої радіоканальної системи, а вибрати провідну, причому провід екранувати за допомогою ПМЛ, що широко застосовується для екранування проводів в різних пристроях.

- Необхідно застосувати екранування індуктора [3], та віддалення блоку керування та приводів переміщення каретки екструдера від індуктора, рекомендується використовувати привід екструдера штовхаючого типу. У разі близького розташування двигунів переміщення та подачі дроту до індуктора, може бути порушена стабільність роботи принтеру і як результат може бути погіршена якість друку.

Конструкція екструдера має виключати наявність феромагнітних деталей, що можуть нагріватися магнітним полем індуктора, це може спричинити несправність екструдера, до того ж це зумовить додаткові втрати на нагрів цих деталей. Також енергія буде втрачатися на нагрів деталі що друкується. Оцінка цих втрат наразі не виявляється можливою оскільки залежить від конфігурації конкретної деталі. Розробка методики розрахунку цих втрат є іншою актуальною задачею, без вирішення якої важко правильно підібрати режим друку.

Особливу увагу слід приділити матеріалу сопла. Основні вимоги до сопла це робота при високих температурах (близько 1400 °С), матеріал має мати якомога меншу здатність до адгезії із розплавленим металом, щоб сопло не забивалося застиглим металом після закінчення друку. Цим вимогам відповідають корунди, шамотні глини та ін.

#### **Висновки:**

1. Використання індуктора у якості джерела нагріву металевого дроту у пристрої для FDM 3d друку має ряд очевидних переваг, але практична реалізація такого підходу ускладнена необхідністю електромагнітного захисту блоку керування та оператора.

2. Необхідна потужність індуктора нелінійно зростає із зменшенням часу нагріву, але для промислового використання цілком достатньо індуктора потужністю близько 200 Вт

3. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку розробки конструкційного виконання блоку екструдера, що міг би забезпечити стабільність процесу друку та методики оцінки втрат на нагрів деталі, що друкується магнітним полем індуктора.

#### **Перелік посилань:**

1. Слухоцкий А.Е., Ненков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В. Установки индукционного нагрева / Под ред. Слухоцкого А.Е. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское издание, 1981. - 328 с.

2. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 126 с.

3. Сидоренко В. Д. Применение индукционного нагрева в машино-строении. -Л.: Машиностроение, 1980. - 230 с.

- 6 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1977. - 343 с.

4. <http://stalkanatsilur.com.ua/ru/opisanie-provoloka-stalnaia/teoreticheskaia-massa-1000-m-provoloki>

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

**Чвортко Є.П.**, к.т.н., доцент кафедри Електрозварювальних установок Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського";

**Чорний А.В.**, к.т.н., заступник директора «ПатонСерт».

Стаття надійшла до редакції 17.11.2016.