

УДК 621.791.7

Разработка конструкции индуктора для индукционной сварки термопластичных углеродно-армированных композиционных материалов

Сыромятников Андрей Дмитриевич^(*)RU4PAB@yandex.ru
SPIN-код: 7964-7155

Паршин Сергей Георгиевич

parshin@spbstu.ru
SPIN-код: 5399-6783

Майстро Алексей Сергеевич

maystro@spbstu.ru
SPIN-код: 4532-4705

СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

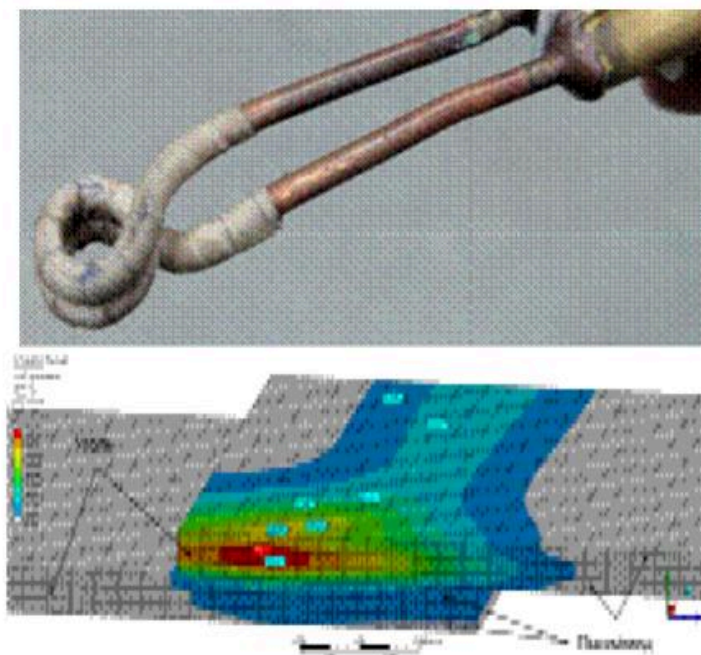
Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования тепловых полей, индуцируемых двумя конструкциями индукторов. Показано, что изменение геометрии и схемы расположения индукторов позволяет повысить эффективность распределения температуры вдоль соединения, что повышает качество сварных соединений углеродно-армированных композитов.

Ключевые слова: индукционная сварка, углеродно-армированные композиты, метод конечных элементов, моделирование

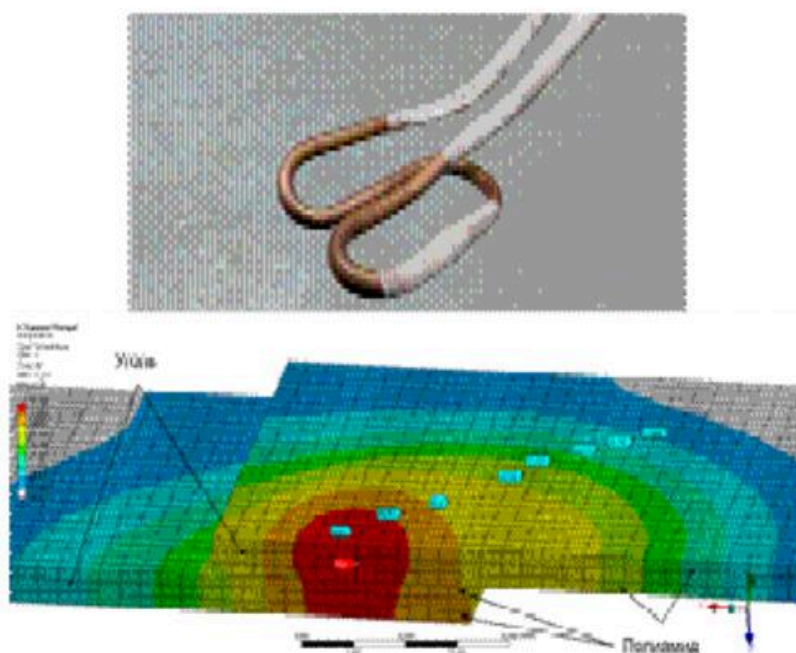
Введение. Индукционная сварка термопластичных углеродно-армированных композиционных материалов основана на возбуждении вихревых токов в углеродном армировании под действием переменного электромагнитного поля индуктора, что приводит к локальному нагреву вследствие джоулевых потерь и плавлению матрицы в зоне соединения. Вместе с тем анизотропия электромагнитных и тепловых свойств углепластиков, сложная геометрия элементов и требование узкого температурного окна для высокотемпературных термопластов (РЕЕК, РЕКК и др.) предъявляют особые требования к геометрии, частотному диапазону и расположению индуктора, от которых напрямую зависят однородность теплового поля и, как следствие, прочность сварного шва [1–3].

Методы и материалы; результаты. Для разработки конструкции индуктора для сварки углеродно-армированных композитов выполнили моделирование теплового поля при высокочастотном нагреве в программном комплексе Ansys с использованием модулей Maxwell для электромагнитных расчетов и Thermal для теплопереноса. В Ansys Maxwell решается система уравнений Максвелла, где учитываются вихревые токи и индукционные потери, генерируемые переменным магнитным полем индуктора. Полученное распределение объемной плотности мощности использовали как источник тепла в ANSYS Thermal для решения нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями, включая конвективный теплообмен и распределение теплоты с учетом теплопроводности, теплоемкости, плотности композита и геометрии заготовки.

Расчет тепловых потерь производили при силе тока 100А и резонансной частоте для каждой конструкции индуктора при нагреве в течение 10 с композита в виде трехслойной модели: полиамид-углерод-полиамид размером 100×100 мм с величиной нахлеста 25 мм. Оптимальное распределение электромагнитного поля, повышение эффективности нагрева и снижение потерь теплоты достигли за счет применения двухвиткового круглого и прямоугольного индуктора при измерении резонансной частоты и температуры нагрева (см. рисунок).



а



б

Резонансная частота круглого (а) индуктора составила 920 кГц при максимальной температуре нагрева 151,19 °С при нагреве в течение 10 с. Применение прямоугольного индуктора (б) при резонансной частоте 671 кГц снижает максимальную температуру до 51,12 °С

Заключение. Компьютерное моделирование и экспериментальная апробация показали, что конструкция индуктора и его ориентация относительно соединения композита существенно влияют на распределение температурного поля вдоль сварного шва и определяют размер зоны расплава. Прямоугольные индукторы создают равномерный поток вдоль оси, но обладают высокой индуктивностью и неравномерно прогревают боковые поверхности из-за поверхностного эффекта и тепловых потерь. Круглые индукторы, состоящие из двух контуров формируют более концентрированное и симметричное поле, уменьшая потери энергии. При проектировании индукторов для индукционной сварки углеродно-армированных композитов нужно учитывать площадь сварного соединения, величину нахлеста деталей, резонансную частоту и количество витков индуктора.

Список источников

- [1] Ageorges R., Ye L., Hou M. Induction welding of thermoplastic composites — an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 9, pp. 1386–1399. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.10.009>
- [2] Lundström F. Induction heating of carbon fibre reinforced polymer composites — characterization and modelling. Thesis for Ph. D., Lund University, 2021.
- [3] Zhang G., Wang Y., Li Z., Zhang X. Experimental and numerical investigations of induction heating for Ti alloy tubes. *Results in Engineering*, 2023, vol. 19, art. no. 101575. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101575>