

Исследование процесса высокочастотной электротермии термопластов на основе его математического моделирования

А.В. Лившиц

Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского 15, Иркутск, Россия
livnet@list.ru

Статья поступила 12.03.2014, принята 17.05.2014

Статья посвящена математическому моделированию процессов высокочастотной электротермии термопластических полимеров для технологической системы, которая представлена в виде пятислойной пластины, включающей электроды, изоляторы и обрабатываемый материал. Математическая модель, представленная в виде системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с внутренним источником тепла для термопласта и граничных условий третьего и четвертого рода, реализована в виде авторского программного обеспечения, которое позволяет решать широкий перечень исследовательских и практических задач высокочастотной обработки полимеров. К таким задачам относятся: изучение взаимовлияния геометрических и электрофизических параметров системы, определение глубины зоны влияния термоизоляторов, эффективной толщины изоляторов, толщины несимметричных изоляторов с целью смещения точки максимального нагрева при организации процесса сварки, времени достижения в обрабатываемом материале температуры сушки термопласта при различных значениях удельной мощности высокочастотной обработки. В статье представлены результаты исследования процессов электротермии и найденные на их основе технические решения.

Ключевые слова: электротермия, термопласт, математическая модель, полимер, термоизолятор, сварка, сушка, полиамид, высокочастотная обработка.

Study of high-frequency electrothermics process of thermoplastics on the basis of its mathematical modeling

A. V. Livshits

Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia
livnet@list.ru

Received 12.03.2014, accepted 17.05.2014

The article is devoted to mathematical modeling of high-frequency electrothermics processes of thermoplastic polymers for technological system, which is presented as a five-layer plate with electrodes, insulators and the material being processed. The mathematical model presented in the form of a system of differential equations of unsteady heat conduction with internal heat source for thermoplastic and boundary conditions of the third and fourth generation, implemented in the form of copyright software which allows to solve a wide range of research and practical problems of high-frequency processing of polymers. Such problems include the study of the mutual influence of geometrical and physical parameters of the system, determination of the depth of the zone of influence of the heat insulators, the effective thickness of the insulator, the thickness of asymmetric insulators to shift the point of maximum heating in the organization of process of welding time in processed material drying temperature thermoplastic at different values of the specific power of the high-frequency processing. The article presents the results of research of electrothermics processes and technical solutions found on their basis.

Keywords: electrothermics, thermoplastics, mathematical model, polymer, heat insulator, welding, drying, polyamide, high-frequency processing

Введение. Современное машиностроение характеризуют высокий уровень конкуренции, повышенные требования к качеству изделий, сокращение цикла производства, снижение материалоемкости изделия. Поэтому в последние десятилетия в ряде отраслей промышленности все большее применение в качестве конструкционных материалов стали находить полимеры. Коррозионная стойкость, высокая удельная прочность и технологичность полимерных изделий позволяют использовать их взамен цветных металлов, нержавеющей сталей и других материалов, позволяя продлевать сроки эксплуатации машин, увеличивать

длительность межремонтных периодов, снижать эксплуатационные издержки. Особое место среди полимеров занимают полиамиды – дешевые, удобные в переработке полимеры, обладающие универсальными эксплуатационными свойствами. Наряду с достоинствами полиамиды обладают и существенным недостатком – за относительно короткие сроки эксплуатации и хранения они значительно снижают прочностные свойства. Так, по данным [1] при годовом хранении полиамидов в разных климатических зонах предел прочности при изгибе может снижаться на 37 %, при растяжении – на 39 %. При этом физико-механические и химико-электрические свойства

полимеров обратимы, что доказано различными исследованиями [2, 3, 4].

подавляющее большинство технологий восстановления полиамидных материалов связано с их разогревом. Это позволяет, с одной стороны, удалять влагу из образца (выполнять его сушку), с другой, при определенных условиях, на начальном этапе развития усталостных трещин, проводить их «залечивание». Наиболее перспективной технологией восстановления, на наш взгляд, является высокочастотная (ВЧ) электротермическая обработка [5, 6]. Интенсивный разогрев полимера изнутри, возможность контроля фазового состояния материала при ВЧ-обработке позволяют организовать высокоэффективные процессы сушки термопластов, но требуют дополнительных исследований.

1. Постановка задачи. Особая роль в исследовании процессов ВЧ-обработки полимерных материалов, исследовании взаимовлияния физико-механических параметров элементов технологической системы ВЧ-обработки отводится математическому моделированию. В работах [7, 8] отмечены недостатки существующих математических моделей, не учитывающих изменения удельной мощности внутренних источников тепла в течение цикла обработки, идеализация конструкции технологической оснастки, не учитывающая наличие изоляционного вкладыша между свариваемым материалом и электродами рабочего конденсатора. Вышеприведенные факты говорят о необходимости, при решении задачи математического моделирования процессов ВЧ-обработки, рассматривать рабочий конденсатор C_{p1} как многослойную пластину «металл (высокопотенциальный электрод) – изолятор (вкладыш) – свариваемый термопласт – изолятор (вкладыш) – металл (заземленный электрод)» (рис. 1).

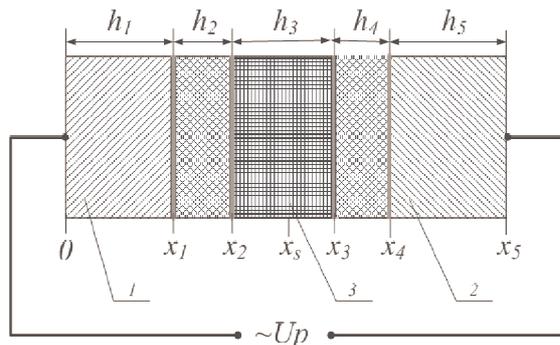


Рис. 1. Высокочастотная обработка деталей из пластмасс в технологической оснастке с двумя изолированными электродами конденсатора C_{p1} , где: h_1, h_5 – толщина высокопотенциального 1 и заземленного 2 электродов; h_2, h_4 – толщины изоляционных вкладышей; x_i – координаты границ слоев; x_3 – координата точки максимального разогрева термопласта 3; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

2. Математическая модель процесса высокочастотного нагрева полимерной детали. В соответствии с [9, 10] распределение температуры в многослойной пластине описывается системой уравнений нестационарной теплопроводности, причем для

термопласта – с учетом внутренних источников тепла. Модификация системы уравнений для случая пятислойной пластины позволяет получить следующий результат:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{c_{p1}(T_1)\rho_1} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{c_{p2}(T_2)\rho_2} \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{\lambda_3}{c_{p3}(T_3)\rho_3} \cdot \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{p_3(\tau)}{c_{p3}(T_3)\rho_3} \\ \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \frac{\lambda_4}{c_{p4}(T_4)\rho_4} \cdot \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_5}{\partial \tau} = \frac{\lambda_5}{c_{p5}(T_5)\rho_5} \cdot \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия:

$$T|_{\tau=0} = T_n, \quad 0 \leq x \leq x_5, \quad (2)$$

где T, T_n – соответственно локальная и начальная температура; x – текущая толщина слоя; $\lambda_j, c_{pj}, \rho_j$ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала слоя; τ – время нагрева; j – номер слоя: 1 – металл, 2, 4 – изоляторы, 3 – обрабатываемый полимер, 5 – металл.

Начальную температуру каждого слоя необходимо принимать равной температуре нормальных условий при обработке единичной или первой заготовки из партии и равной локальной температуре соответствующего слоя предыдущей обработки при нагреве последующих.

Граничные условия на внешних границах электродов соответствуют условиям третьего рода:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \alpha_1 \Delta T_1, \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=x_5} = \alpha_5 \Delta T_5, \quad (3)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплообмена, $\Delta T_1, \Delta T_2$ – разницы температур поверхности тела и окружающей среды.

Принимая во внимание относительно низкие температуры плавления исследуемых термопластов и высокую динамику разогрева, теплообмен с окружающей средой при обработке первых и единичных заготовок можно считать пренебрежимо малым:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=x_5} = 0. \quad (4)$$

На границах слоев температуры и тепловые потоки равны (граничные условия четвертого рода):

$$T_i = T_{i+1} \quad \text{при } x = x_i \quad (i = 1 \dots 4). \quad (5)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \quad \text{при } x = x_i \quad (i = 1 \dots 4). \quad (6)$$

Следует отметить, что в правой части уравнения для полимера (1) записана мгновенная удельная мощность $p_3(\tau)$, определяемая расчетно-экспериментальным путем.

3. Программный комплекс Aleo_HFH. Решение системы дифференциальных уравнений выполнено численно, с использованием метода конечных разностей и

реализовано в виде программного комплекса Aleo_HFH [11]. Интерфейс комплекса представлен на рис. 1.

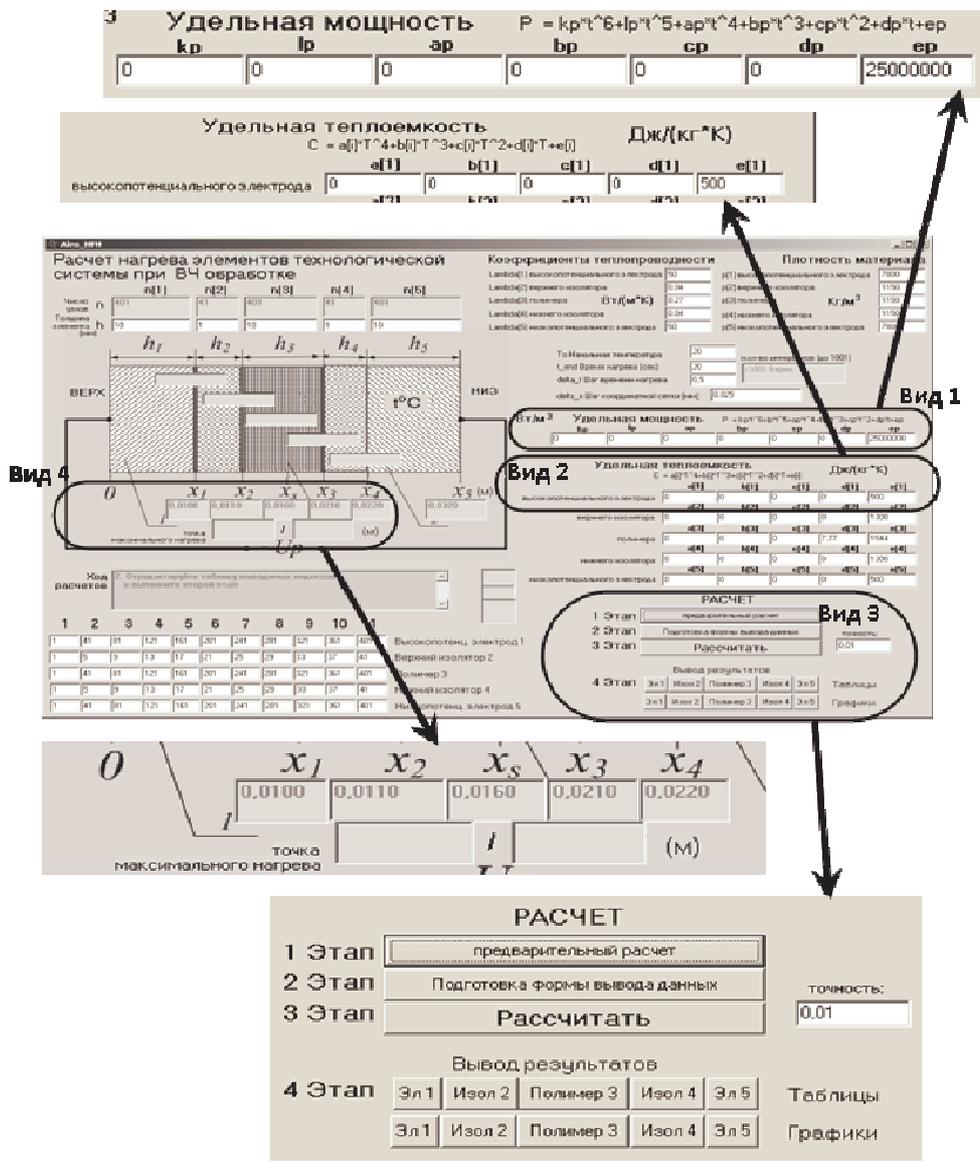


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса Aleo_HFH

Принимая во внимание нестационарность процесса, удельная мощность и удельная теплоемкость для каждого слоя задаются коэффициентами полиномов (рис. 1 – вид 1, 2). Представление данных параметров в виде полиномов позволяет использовать программный комплекс для самого широкого перечня материалов и динамики процессов нагрева. Последнее особенно важно для исследования автоматизированных систем ВЧ-обработки.

С целью визуального промежуточного анализа результатов расчетов температура на границах слоев и максимальная температура полимера выводятся в основном окне программного комплекса. Кроме этого программа позволяет выводить температуру в узлах для каждого временного интервала в табличном и графическом виде (рис. 1 – вид 3, рис. 2). Табличные

данные легко переносятся в другие программные продукты для дальнейшего анализа.

Исследовательские возможности комплекса позволяют изучить взаимовлияние геометрических и электрофизических параметров системы не только при организации процесса сушки полимеров с целью восстановления их прочностных параметров, но и процесса сварки полимерных деталей различных толщин.

Принимая во внимание сложные законы изменения удельной мощности ВЧ-обработки, в дальнейших расчетах будет использована эквивалентная удельная мощность $p_{уд}^* = const$, обеспечивающая действительное время достижения температуры сушки полимера. При этом распределение температуры по сечению детали остается практически идентичным, с отклонением температуры на поверхности детали 3 °С, или 1,6 %.

Точность численного решения системы дифференциальных уравнений методом конечных разностей определяют ошибки аппроксимации, и прежде всего величины шагов временной Δt и пространственной Δx сетки. В случае обеспечения количества узлов сетки на слой не менее 10 и изменения Δt в диапазоне 0,1...1 сек. и Δx в диапазоне 0,01...0,2 мм отклонения результатов расчета температуры нагрева деталей из полиамида, близких к температуре плавления, при различных толщинах слоев не превышали 0,06 %. Следовательно, данные диапазоны шагов сетки можно рекомендовать для практического использования.

Соответствие математической модели реальному процессу нагрева было определено на основе сопоставления результатов расчетов и результатов экспериментальных исследований. Дополнительно для достижения максимальной объективности были использованы результаты экспериментальных

исследований сторонних авторов. Так, в диссертационном исследовании С.Н. Румынского приведены экспериментально полученные графические зависимости удельной мощности внутренних источников тепла от времени $p(\tau)$, вычисленные как функции анодного тока $I_{ao}(\tau)$ и напряжения на добавочном конденсаторе $U_{доо}(\tau)$ при ВЧ-сварке соединения «крышка – корпус» аккумулятора КСМ10Р. Расчет времени достижения температуры первого максимума удельной мощности, соответствующего температуре первого фазового перехода полиамида, с использованием предложенной математической модели составляет 47,5 сек. с отклонением от данных эксперимента $\Delta=2,1\%$, что можно считать удовлетворительным результатом. Это позволяет говорить о возможности использования созданного программного обеспечения для решения практических и исследовательских задач.

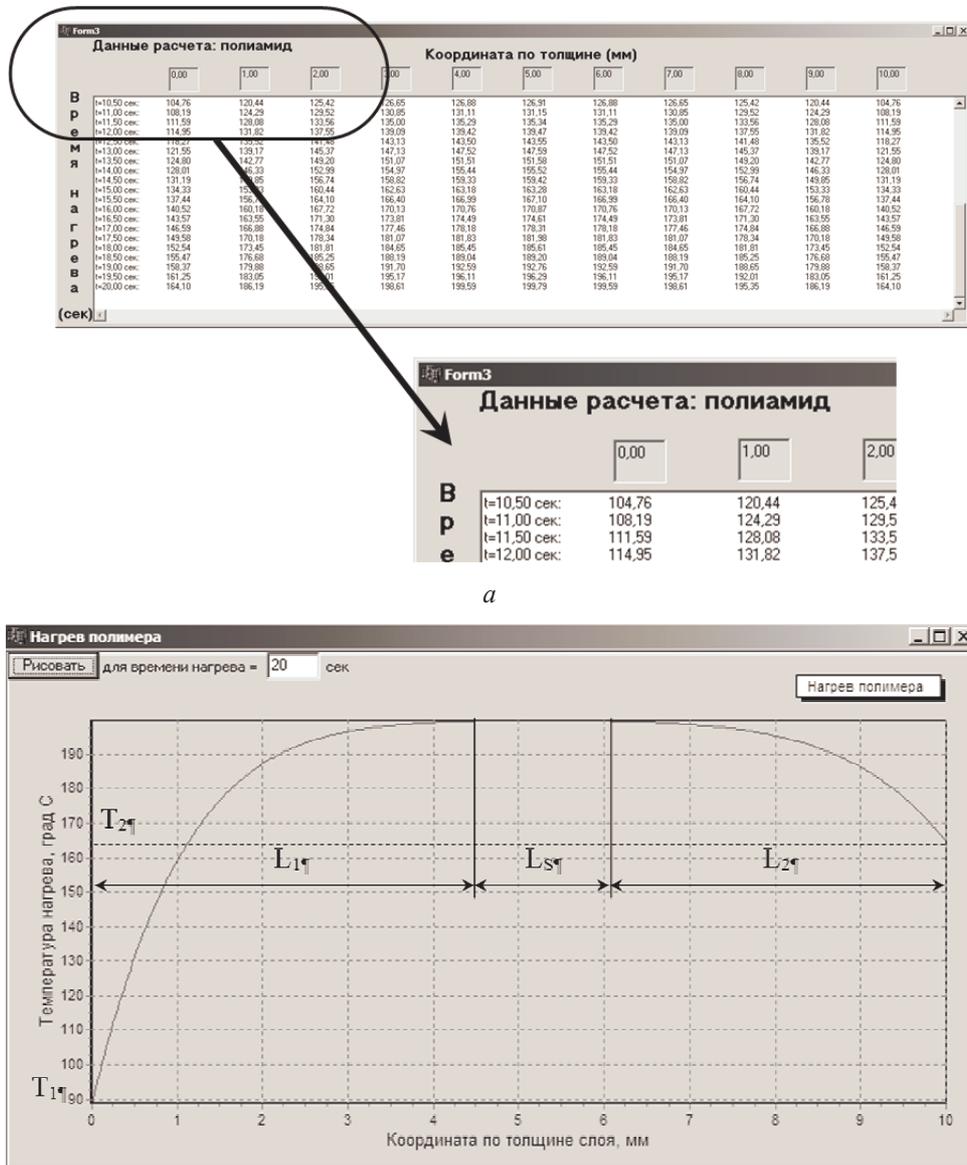


Рис. 2. Формы вывода результатов расчетов: а – в табличном виде; б – в графическом виде

4. Исследование взаимовлияние геометрических и электрофизических параметров технологической системы. Общая картина распределения температурного поля по толщине обрабатываемого полимера, определяемая наличием внутреннего источника тепла, получаемая при помощи программного комплекса, представлена на рис. 2. На графике можно выделить три зоны: зону равномерного нагрева L_S и краевые зоны термического влияния контактирующих с полиамидом поверхностей. Зоны термического влияния характеризуются глубинами L_1, L_2 и температурами контактных поверхностей T_1, T_2 . Характеристики указанных зон определяются геометрией многослойной пластины, электрофизическими параметрами составляющих ее материалов и требуют дополнительного исследования.

На рис. 3 в графическом виде представлены результаты расчета максимальной температуры нагрева полиамидной детали в зависимости от ее толщины при различных толщинах симметрично расположенных изоляторов из электроизоляционного картона ГОСТ 2824-86 ($P_{уд} = \text{const} = 2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$, время нагрева $T = 30$ сек., $\Delta t = 1$ сек., $\Delta x = 0,025$ мм). $P_{уд} = \text{const} = 2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$

соответствует потребляемой мощности ВЧ-установки $P = 2$ кВт при габаритах обрабатываемого полимерного образца $0,1 \times 0,1 \times 0,01$ м.

Анализ данных, представленных на рис. 3, позволяет говорить, что при увеличении толщины нагреваемой детали температура полиамида в центре стремится к некоторому значению, определяемому интенсивностью нагрева и электрофизическими параметрами системы. Данный факт объясняется снижением термического влияния изолирующего картона. Более того, необходимо отметить, что увеличение толщины изолятора более 1,5...2 мм практически не изменяет зону термического влияния изоляторов, что позволяет говорить о некоторой эффективной с энергетической точки зрения толщине изолятора, превышение которой повышает энергопотребление, время нагрева полимера. Зная квадратичный закон изменения удельной мощности при ВЧ-нагреве от расстояния между электродами, данный факт можно расценивать как негативный при сушке. Однако при этом он может расцениваться как резерв повышения качества сварки тонких пленок за счет снижения скорости разогрева.

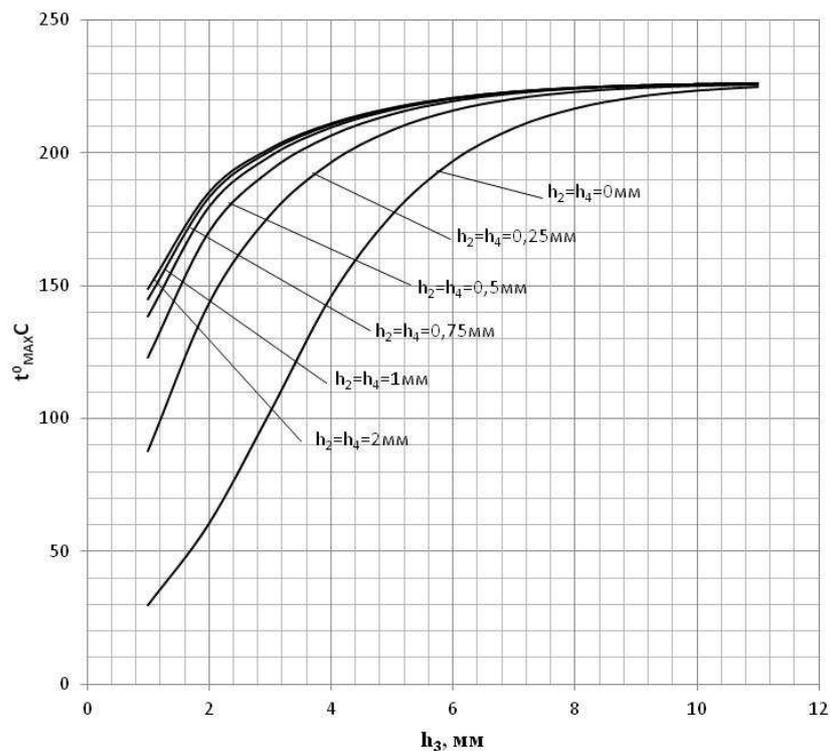


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры детали от ее толщины при различной толщине изоляторов (ПА 66, $p_3 = 2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$, $T = 30$ сек.)

Графики на рис. 4 отображают результаты расчетов, использованные при построении графиков на рис. 3, в виде зависимости максимальной температуры нагрева от толщины изолятора. Такое построение позволяет в первом приближении графически определить эффективную толщину изолятора.

Интенсивность ВЧ-воздействия также влияет на глубину зоны термического влияния и эффективную толщину изолятора. На рис. 5 показана зависимость

Время разогрева может снижаться значительно, так, нагрев до температуры плавления детали толщиной

глубины зоны температурного влияния изолятора от толщины изолятора из электроизоляционного картона при различной удельной мощности воздействия ($h_3 = 10$ мм). Увеличение мощности в 2,5 раза позволило снизить глубину зоны термического влияния на 25 %, что может считаться положительным фактором с точки зрения равномерного разогрева полимера. При этом эффективная толщина изолятора остается практически постоянной (~1,4...1,5 мм).

2 мм с изоляторами толщиной выше эффективной ускоряется в 2,8 раза, толщиной 10 мм – в 2,54 раза (рис. 6).

На рис. 7 и 8 приведены расчетные данные температуры полиамида по сечениям, нагретого до температуры плавления и температуры сушки соответственно, при $h_3 = 10$ мм, при различных толщинах изоляторов. Графики дают возможность визуально наблюдать значительно более равномерный

разогрев полимера даже при наличии минимальной толщины изоляторов, что положительно при сушке, но может создавать проблемы при обеспечении качества сварного соединения полимерных деталей. Интересно, что снижение температуры на 10 % относительно температуры плавления (что соответствует температуре сушки) приводит к значительному расширению области равномерного прогрева L_S (в два раза, с 2,5 мм при сварке – до 5 при сушке).

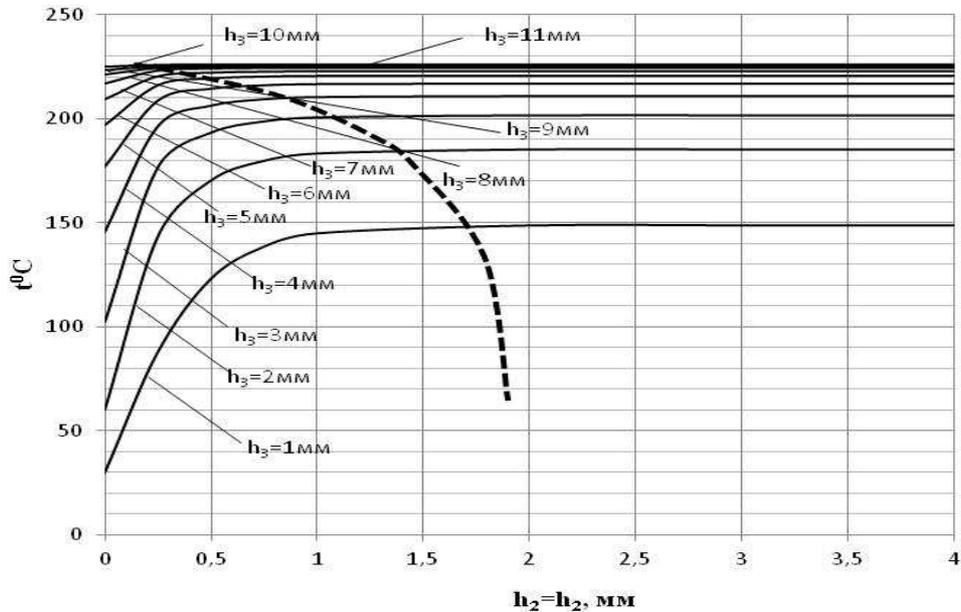


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры детали от толщины изоляторов (ПА 66)

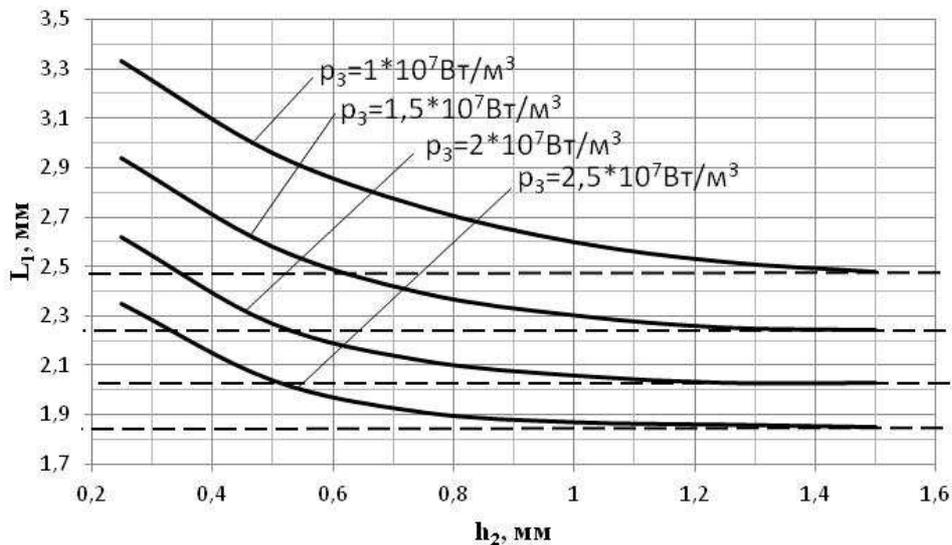


Рис. 5. Зависимость глубины зоны термического влияния изолятора L_1 от толщины изолятора h_2 при различной удельной мощности воздействия (ПА 66, $h_3 = 10$ мм)

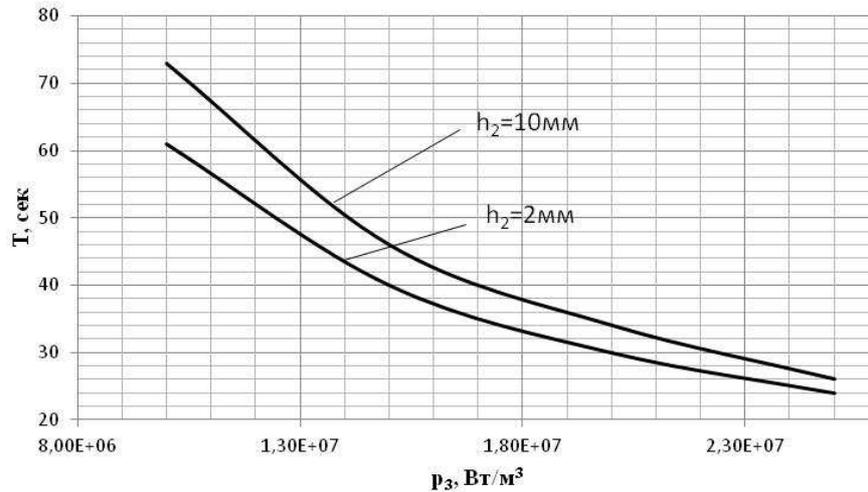


Рис. 6. Зависимость времени нагрева полиамида до температуры плавления при различной удельной мощности воздействия и толщине детали (ПА 66, $h_2 = h_4 = 4$ мм, $h_3 = 4$ мм, $p_3 = 2 \cdot 10^7$ Вт/м³)

До сих пор мы рассматривали процессы ВЧ-нагрева с симметрично расположенными изоляторами одинаковой толщины, что соответствует эффективно организованному процессу сушки с относительно равномерным прогревом полимера. Однако для повышения качества сварного соединения и эффективности процесса при сварке необходимо, в противовес сушке, организовать максимальный нагрев в локальной зоне сварки с минимальным разогревом периферийных зон. При этом смещение точки достижения температуры плавления (X_S) видится наиболее важным.

Максимального смещения можно достичь, поставив со стороны одного электрода изолятор толщиной h_2 , выше эффективной, и исключив изолятор со стороны второго электрода. На рис. 9 представлены различные комбинации расположения изоляторов при сварке полимеров суммарной толщиной 4 мм.

Изменяя толщину картона, возможно достичь смещения точки максимального нагрева от центрального ее расположения 1,15 мм (X_{SI}), что

соответствует эффективной сварке деталей толщиной 3,15 и 0,85 мм (график 1).

Некоторое влияние на смещение координат точки максимального нагрева X_S оказывает изменение удельной мощности воздействия. Возможное смещение для сварки деталей суммарной толщиной 4 мм в диапазоне удельных мощностей от $1,5 \cdot 10^7$ до $2,5 \cdot 10^7$ Вт/м³ показано на рис. 10.

В отношении оставшихся вне рассмотрения параметров изоляторов, таких, как коэффициент теплопроводности λ_2 , удельная теплоемкость c_{p2} и плотность ρ_2 , можно сказать следующее: в широком диапазоне изменяется только плотность. Разнообразие различных картонов достаточно велико, от картона чемоданного ГОСТ 22351-77 ($c_{p2} = 485$ кДж/м³) до картона электроизоляционного для трансформаторов и аппаратов с масляным заполнением ГОСТ 4194-88 ($c_{p2} = 1300$ кДж/м³). Расчеты с использованием предложенного программного комплекса показывают, что влияние плотности изолятора при прочих постоянных параметрах оказывает незначительное влияние на динамику разогрева полимера.

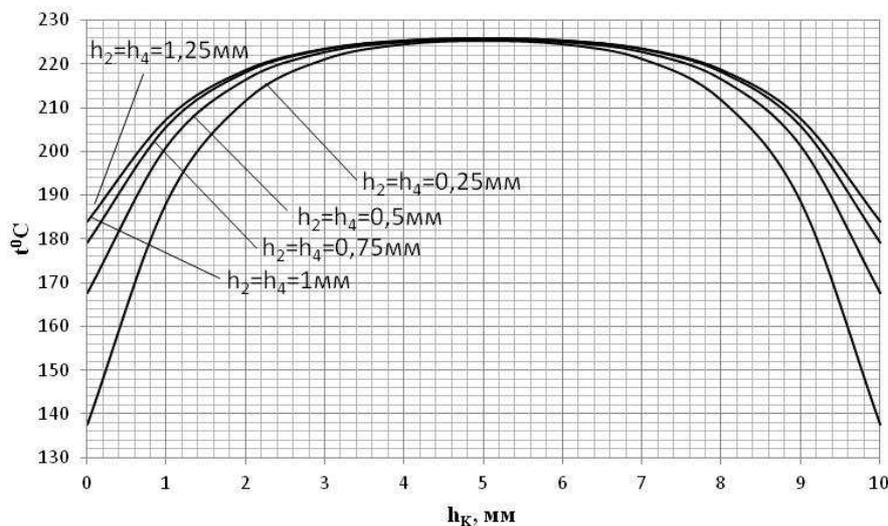


Рис. 7. Распределение температуры по сечению полиамидной детали при ее нагреве до температуры плавления при различных толщинах изоляторов (ПА 66, $h_3=10$ мм, $\rho_3=2 \cdot 10^7$ Вт/м³)

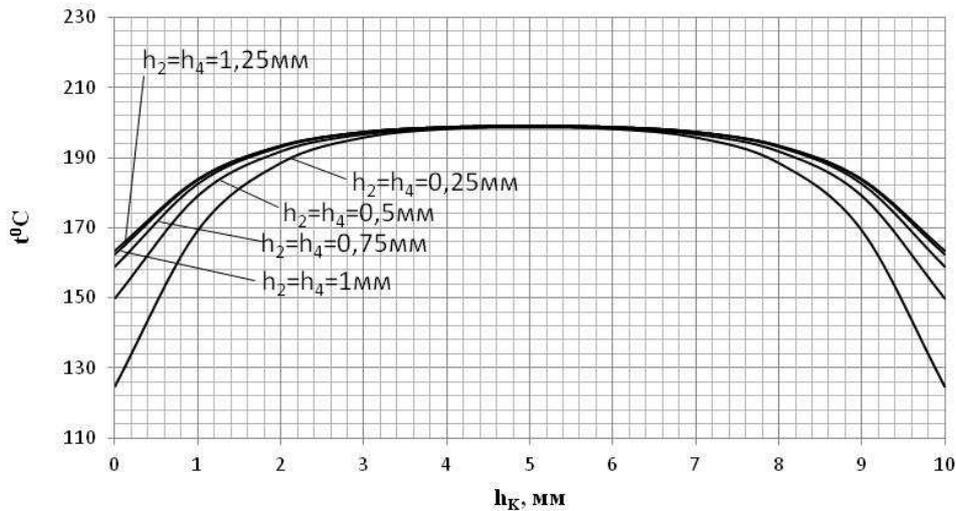


Рис. 8. Распределение температуры по сечению полиамидной детали при ее нагреве до температуры сушки при различных толщинах изоляторов (ПА 66, $h_3=10$ мм, $\rho_3=2 \cdot 10^7$ Вт/м³)

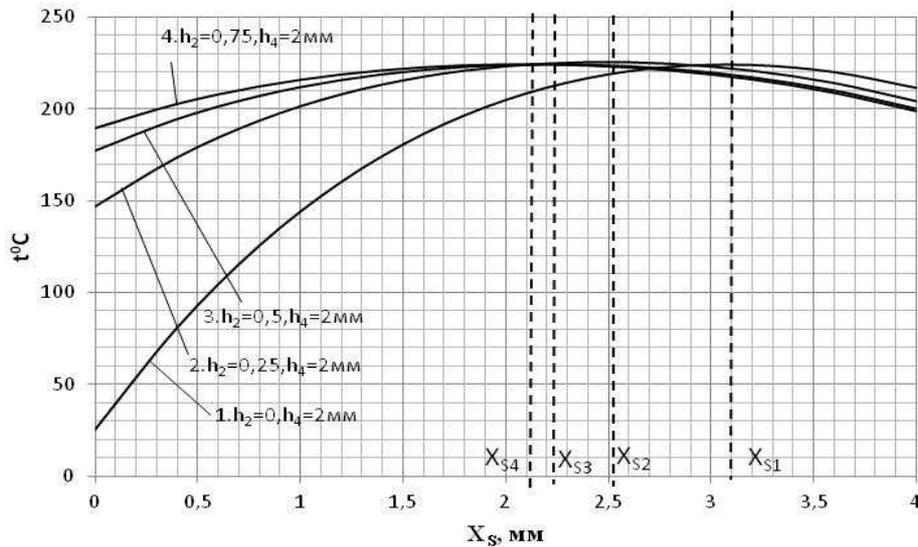


Рис. 9. Влияние несимметричных изоляторов на координату точки максимального нагрева X_S полиамида (ПА 66, $h_3=4$ мм, $\rho_3=2 \cdot 10^7$ Вт/м³)

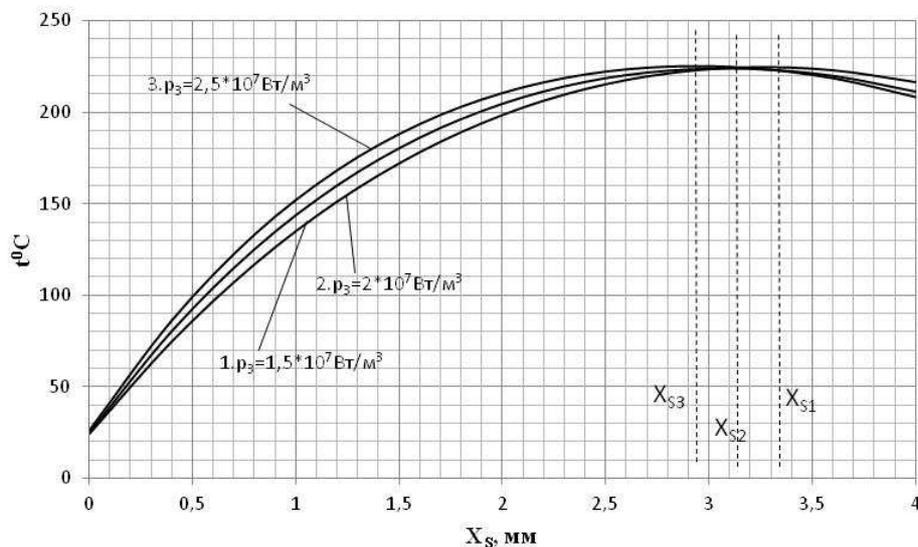


Рис. 10. Влияние удельной мощности воздействия на координату точки максимального нагрева X_S полиамида (ПА 66, $h_2=0$ мм, $h_4=4$ мм, $h_3=4$ мм)

Заключение

Опираясь на представленные в статье результаты, можно сделать следующее заключение: предложенная математическая модель и реализующий ее программный комплекс позволяют решать ряд задач исследовательского и практического характера. Исследовательские возможности комплекса, направленные на изучение взаимовлияния геометрических и электрофизических параметров системы, позволили получить ряд интересных результатов для их использования при управлении технологическими процессами электротермической обработки материалов и сформировать перечень задач практической направленности, при которых целесообразно использовать предлагаемый программный комплекс. К таким задачам относятся: определение глубины зоны влияния термоизоляторов, эффективной толщины изоляторов для организации энергоэффективной сушки, сварки полимеров; расчет толщины несимметричных изоляторов с целью смещения точки максимального нагрева при организации процесса сварки; прогнозирование времени достижения в обрабатываемом материале температуры сушки термопласта при различных значениях удельной мощности ВЧ-воздействия с целью принятия решения о выборе оптимальных режимов сушки и построения новых методов и методик диагностирования дефектов полимерных деталей на основе контроля динамики разогрева [8, 13, 14].

Вышеперечисленные решения использованы при организации процессов управления сваркой полимерных деталей применительно к полиграфической промышленности [8], процессов сушки при восстановлении эксплуатационных свойств полимерных сепараторов подшипников буксовых узлов железнодорожного подвижного состава [14] и организации процессов диагностики наличия дефектов таких сепараторов [13].

Литература

1. Суворцев В.И., Безуглая Т.Н., Саморядов А.В., Дьякова Л.М., Гончаренко Л.А. Изменение структуры и свойств наполненного полиамида ПА-6 при длительном хранении в различных климатических зонах // Пластические массы. 1989. № 8. С. 23-26.
2. Лившиц А.В., Попов С.И., Филиппенко Н.Г. Экспериментальные исследования возможности восстановления изделий из полимерных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы третьей всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 13-17 мая 2013 г. Иркутск: ИрГУПС, 2013. С. 430-437.
3. Павлов Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. 212 с.
4. Лившиц А.В., Попов С.И., Филиппенко Н.Г. Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава // Сб. науч. тр. SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012», 2-12 окт. 2012 г. Одесса, 2012. Т. 2. С. 39-43.
5. Lowe David J., Wilmington DE. Rapid drying of polyamide resins using high frequency electric fields: пат. 5237755 США. № 07/805148; заявл. 12. 11. 91; опубл. 08. 24. 93, Бюл. 6 с.
6. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Контроль и управление высокочастотной электротермией. Новые аспекты: моногр. // LAP Academic Publishing AV

Akademikerverlang GmbH & Co. KG Heinrint-Bocking-Str.6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland, 2013. 157 с.

7. Трофимов Н.В., Марков А.В. Математическая модель оптимального режима высокочастотной сварки пластмасс // Материалы XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21)». Псков: Псков. гос. политехн. ин-т, 2009. Т. 10. С.71-73.
8. Филиппенко Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012. 161 с.
9. Марков А.В., Грачев С.Ю. Математическая модель высокочастотной сварки термопластов // Материалы 19 международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-19. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад. 2006. Т. 5. Секция 5. С. 87-89.
10. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
11. Расчет нагрева элементов технологической системы при высокочастотной термической обработке: программа для ЭВМ. Св. ГР № 2013617957 зарег. 28. 08. 2013.
12. Румынский С.Н. Автоматизированная система управления процессом сварки изделий из полиамида: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 98 с.
13. Лившиц А.В., Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г. Диагностика изделий из полимерных материалов методом высокочастотного излучения // Материалы пятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», 31 марта – 4 апр. 2014 г. Иркутск: ИрГУПС, 2014.
14. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013.

References

1. Surovtsev V.I., Bezugly T.N., Samoryadov A.V., Diacov L.M., Goncharenko, L.A. Changing the structure and properties of the filled polyamide PA-6 at long storage in different climatic zones // Plastic massy. 1989. № 8. P.23-26.
2. Livshits A.V., Popov S.I., Filippenko N.G. Experimental studies of the possibility of recovery of products from polymeric materials // Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy tret'ej vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, 13-17 maja 2013 g. Irkutsk: IrGUPS, 2013. P. 430-437.
3. Pavlov N.N. The ageing of plastics in natural and artificial conditions // M: Himiya, 1982. 212 p.
4. Livshits A.V., Popov S.I., Filippenko N.G. Restoring the bearings of axle equipment of the rolling stock // Sb. nauch. tr. SWorld. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchnye issledovaniya i ih prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostojanie i puti razvitiya 2012», 2-12 okt. 2012 g. Odessa. 2012. Vol. 2. P.39-43.
5. Lowe David J., Wilmington D.E. Rapid drying of polyamide resins using high frequency electric fields: pat. 5237755 USA, №07/805148; decl. 12.11.91; publ. 08.24.1993; Bul. 6 p.
6. Filippenko N.G., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. Monitoring and control of high-frequency electrothermics. New aspects: monogr. // LAP Academic Publishing AV Akademikerverlang GmbH & Co. KG Heinrint-Bocking-Str.6-8, 66121 Saarbrücken, Germany, 2013. 157 p.
7. Trofimov N.V., Markov A.V. Mathematical model of optimal mode of high-frequency plastic welding // Materialy NHIH Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah (MМТТ-21)». Pskov: Pskov. gos. politehn. in-t, 2009. P.71-73.
8. Filippenko N.G. Automation control process of high-frequency processing of polymeric materials. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science. Irkutsk, 2012. 161 p.
9. Markov A.V., Grachev S.Y. Mathematical model of high-frequency welding of thermoplastics // Materialy 19 mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah» ММТТ-19. Voronezh: Voronezh. gos. tehnol. akad. 2006. Vol. 5. Section 5. P. 87-89.
10. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Difference methods for

solving heat transfer // Tomsk: Izd-vo TPU, 2007. 172 p.

11. Calculation of heating the elements of technological systems in high-frequency thermal processing: PC program. Ownership certificate № 2013617957; regist. 28.08.2013.

12. Ruminsky S.N. Automated control system of welding process for polyamide products: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science. SPb.: 2005. 98 p.

13. Livshits A.V., Larchenko, A.G., Filippenko N.G., Diagnostics

of the products made of polymeric materials by high-frequency radiation method // Materialy pjatoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona», 31 marta – 4 apr. 2014 g. Irkutsk: IrGUPS, 2014.

14. Popov S.I. Automation control of technological processes of restoration of operational properties of polymers. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Science. Irkutsk. 2013.