

ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС. ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Предложен итерационный алгоритм расчета параметров процесса ультразвуковой сварки (УЗС) на базе трибологической системы, которая определяется как некая логико-математическая структура, элементами которой являются подсистемы материалов, излучения, динамики, внутреннего трения, термодинамики и собственно ультразвукового инструмента. Выработаны критерии сходимости итерационного процесса для существенно нелинейной модели УЗС. Приведены тестовые расчеты для нескольких типов сварочных рабочих наконечников.

Ключевые слова: трибологическая система, высокочастотное нагружение, ультразвуковая сварка, нелинейная математическая модель, итерационный алгоритм, критерии сходимости.

Введение. Ультразвуковая сварка (УЗС), как один из наиболее эффективных методов высокочастотного нагружения, находит все большее применение при решении проблем соединения отдельных узлов и элементов в производстве изделий, как из металлических, так и из полимерных термопластичных материалов. Это стало возможным благодаря совершенствованию технологии сварки, оптимизации режимов ультразвукового воздействия и повышению точности дозирования ультразвуковой энергии, вводимой в зону сварки. Условия ввода энергии и режимы сварки, как правило, оптимизируются в ходе экспериментальной отработки технологии для каждого изделия отдельно и затем используются при его серийном производстве. При этом несущественные для нормального функционирования изделия отклонения геометрических размеров отдельных узлов и изменения свойств материалов нарушают оптимальность процесса сварки, приводят к снижению качества соединений и браку конечной продукции.

Анализ последних исследований и литературы. Ультразвуковая сварка (УЗС) по своей сути является типовым процессом высокоскоростного нагружения, при котором важную роль играют внутреннее и внешнее трение, а при моделировании таких процессов необходимо учитывать нелинейные процессы диффузии, тепло и массопереноса в зоне сварки [1-9].

Процесс образования сварного соединения характеризуется сложным взаимодействием многочисленных и разнородных факторов. С одной стороны, это комплекс явлений, связанный с интенсивными процессами внешнего трения, повышения температуры в свариваемых материалах, растрескиванием твердых и выгоранием жировых пленок, повышением пластичности, обмятием микро- и макронеровностей, сближением контактирующих поверхностей на расстояние, близкое к межатомному, и т.п. С другой стороны — это комплекс явлений, связанных с состоянием, способностью энергетического тракта подать эту энергию в зону сварки.

Непрерывное ужесточение требований к качеству формируемых соединений, расширение ассортимента

свариваемых материалов, увеличение размеров и усложнение конструкций изделий обуславливают необходимость поиска путей автоматического установления оптимального ультразвукового (УЗ) воздействия при формировании каждого сварного соединения. Для выбора и поддержания оптимального воздействия в процессе формирования соединений требуется учитывать влияние всех факторов, осуществлять непрерывный контроль состояния соединяемых материалов и условий протекания процесса, обеспечивая при этом работу УЗ аппарата с максимальной эффективностью.

В статье [10] была предложена трибологическая система УЗС, определяемая как логико-математическая структура, элементы которой классифицируются как ее основные подсистемы: подсистема материалов и их свойств, подсистема излучения ультразвука, динамическая подсистема, подсистема внутреннего трения, термодинамическая подсистема и подсистема ультразвукового инструмента (УЗИ), которые базируются, в том числе, и на эмпирических и полуматематических базах данных.

Целью данной статьи является создание эффективной модели, которая адекватно описывает процессы, происходящие в зоне сварки, и обеспечивает широкие возможности при моделировании процесса сварки разнообразных узлов и деталей.

Постановка проблемы. Исследования в представляемой работе направлены на разработку итерационного алгоритма расчета параметров процесса ультразвуковой сварки на базе трибологической системы и определения критериев сходимости итерационного процесса для существенно нелинейной модели УЗС.

Результаты исследований. Определенная в [10] трибологическая система процесса ультразвуковой сварки пластмасс с учетом формализованных подсистем, входящих в нее, представляет собой существенно нелинейную структуру, для решения которой предлагается следующий итерационный процесс:

1. Определяется начальное температурное поле в объеме установленной зоны трибологической системы.

При этом начальное поле температур целесообразно установить постоянным и равным, например, температуре окружающей среды. Начальные границы трибосистемы могут быть установлены в форме полусферы с радиусом, например, равным 4-5 диаметрам излучателя ультразвукового инструмента или 2-3 толщинам верхней детали.

2. В подсистеме материалов при заданном поле температур вычисляются значения физико-механических параметров материалов деталей, которые свариваются.

3. Создаваемое ультразвуковым сварочным инструментом поле давлений в сварочной зоне определяется в подсистеме излучения, где выбор типа элементарных излучателей базируется на полуэмпирических данных и накопленном опыте.

4. В соответствии с выбранной моделью материалов в динамической подсистеме строится распределение деформаций в зоне трибологической системы, вызванное соответствующим ультразвуковым воздействием.

5. В подсистеме трения на базе используемой модели внутреннего трения строится объемное распределение функции тепловых источников.

6. По решению задачи теплопроводности в термодинамической подсистеме определяется новое распределение температур материалов по объему трибосистемы.

7. Если критерий сходимости процесса удовлетворяется, то процесс расчета трибосистемы завершается. В качестве критерия сходимости может быть использовано, например, интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы, изменение границы трибосистемы или какие-то другие показатели. Если сходимость процесса не достигнута, то установленное в п.6 распределение температур передается в подсистему материалов и процесс по п.п.2-7 продолжается. При этом производится уточнение пространственной границы поверхности трибологической системы.

Тестовые примеры. Для подтверждения эффективности выбранной трибологической модели процесса ультразвуковой сварки были решены тестовые примеры с использованием нескольких типов ультразвуковых рабочих наконечников – сонотрод для шовной УЗ сварки пластин, сонотрод для контактной точечной сварки, сонотрод 1 для запрессовки втулок и сонотрод 2 для запрессовки втулок.

Физические свойства полимеров, которые наиболее часто используются для изготовления деталей, подвергаемых ультразвуковой сварке, приведены в табл. 1.

Для всех тестовых примеров начальное поле температур устанавливалось постоянным и равным $T_0=20^{\circ}\text{C}$, начальные границы трибосистемы устанавливались в форме полусферы с радиусом равным 5 радиусам излучателя ультразвукового инструмента.

Основные расчетные параметры трибосистемы приведены в табл. 2.

Для тестовых примеров зависимость физико-механических параметров материалов деталей, которые свариваются, от температуры устанавливалась линейной, элементарные УЗ излучатели моделировались монополями, распределение поля деформаций материала, вследствие воздействия УЗ колебаний, строилось по модели вязкоупругого тела Кельвина–Фойгта, а решение задачи теплопроводности производилось сеточными

методами [9] на сетке контрольных точек области построения поля звукового давления в подсистеме излучения [10].

Таблица 1 - Физические свойства полимеров

Параметр	Полиамид -6.6	Полиэтилен	ПОМ (ПОМ)	ПВХ (PVC) (мягкий)	ПВХ (PVC) (твердый)	Полистирол (цельный)	АБС (ABS)	Полиуретан
Удельная масса, г/см ³	1.14	0.95	1.42	1.3	1.4	1.05	1.05	1.26
Предел прочности на разрыв, МН/м ²	60	24	75	16	60	55	50	50
Предел прочности на изгиб, МН/м ²	38	37	108	-	-	35	-	-
Относительное удлинение при разрыве, %	140	350	65	400	40	30	3	600
Коэффициент эластичности, МН/м ²	1500	1000	3000	20	3000	2500	2500	25
Ударная вязкость (прочность), КДж/м ²	17	3	8.5	-	30	6.5	12	-
Максимальная рабочая температура, °С	120	80	100	80	80	81	80	80
Тангенс угла диэлектрических потерь	0.15	0.001	0.025	0.1	0.1	0,0004	0.015	0.1
Электрическая прочность, МВ*м	30	53	70	30	32	>40	85	20
Горючесть, по UL94(США)>1.6 мм	V2	-	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
Коэффициент трения по стали	0.3	0.25-0.3	0.25	-	0.5	0.5	0.5	0.15-0.4
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ /°С	85	200	120	70	-	90	-	-

Таблица 2 - Расчетные параметры трибосистемы

Тип наконечника	Радиус, мм	Амплитуда, мкм	Частота колебаний, кГц	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	T _{вэс}
Шовная сварка	6	10	50	1050	2600	130
Контактная сварка	3	40	22	1000	3600	120
Сонотрод 1	1,15	2	10	1000	2490	130
Сонотрод 2	6,3	8	22	1000	2490	150

В качестве критерия сходимости процесса расчета использовалось интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы.

Результаты расчета, демонстрирующие установившееся поле температур в границах трибосистемы процесса УЗ сварки, для разных сварочных наконечников представлены на рис. 1-4. При этом на рисунках красно-зеленая область демонстрирует эффективную зону сварки, а граница между желтым и синим цветами

определяет установившуюся границу трибологической системы процесса УЗ сварки.

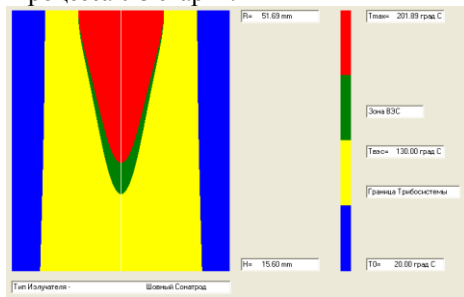


Рис. 1 - Соноотрод для шовной УЗ сварки пластин

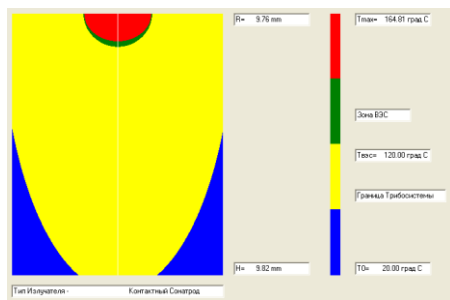


Рис. 2 - Соноотрод для контактной точечной сварки



Рис. 3 - Соноотрод 1 для запрессовки втулок

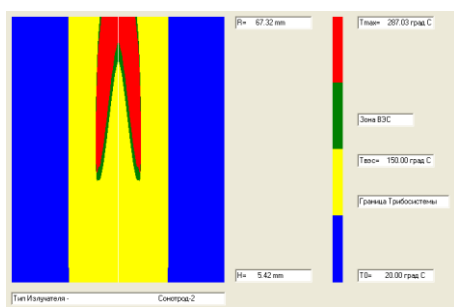


Рис. 4 - Соноотрод 2 для запрессовки втулок

Выводы. Для решения трибологической системы процесса ультразвуковой сварки пластмасс и полимеров с учетом формализованных подсистем, входящих в нее и представляющую собой существенно нелинейную структуру, разработан эффективный

итерационный процесс и предложены соответствующие критерии сходимости, а в качестве критерия сходимости используется интегральное приращение тепловой энергии по объему трибосистемы.

Разработано специализированное программное обеспечение для численного моделирования процесса УЗС пластмасс и полимеров.

Эффективность разработанной трибологической модели процесса ультразвуковой сварки подтверждена решением тестовых примеров процесса УЗС с использованием нескольких типов ультразвуковых рабочих наконечников.

Список литературы: 1. Основы трибологии (износ, трение, смазка) [Текст] / под. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с. 2. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский //: Учебник для вузов / Под ред. Д.Г. Громаковского. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. - 268 с. 3. Исаков С.М. Трибосистема в якості моделі УЗ зварювання/ С.М. Ісаков //MicroCAD-2013: XXI між нар. Наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – Харків – травень.-2013.-Ч.1. - 1С. 4. Автономова Л.В. Управление параметрами технологического процесса структурно-связанной акустической системы / Л.В. Автономова, С.Н. Исаков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2008.- No 1/5 (31-2008). - с. 3-6. 5. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов // Л.: Машиностроение [Текст], 1988. -221 с. 6. Горячева И.Г. Контактные задачи в трибологии/ И.Г. Горячева, М.Н. Добычин // М.: Машиностроение, 1998. - 256 с. 7. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел/ В. В. Матвеев // - Киев: Наукова думка, 1985.- 264с. 8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979. - 416 с. 9. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена/ В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов // – М.: Наука, 1984. - 286 с. 10. Исаков С.Н. Построение трибологической системы ультразвуковой сварки/ С.Н. Исаков // Вісник НТУ «ХПІ». 36. наук. праць. Серія: Динаміка і міцність машин. - X. : НТУ «ХПІ». - 2013. – No63(1036) . – с. 55 –59.

Bibliography (transliterated): 1. *Osnovy tribologii (iznos, trenie, smazka).* pod. red. A.V. Chichinadze. – Moscow: Mashinostroenie, 2001. – 663 p. Print. 2. Berkovich I.I., Gromakovskij D.G. *Tribologija. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehniczeskie prilozhenija: Uchebnik dlja vizov* pod red. D.G. Gromakovskogo. - Samara: Samar. gos. tehn. un-t, 2000. - 268 p. Print. 3. Isakov S.M. *Trybosystema v yakosti modeli UZ zvarjuvannya* MicroCAD-2013: KhKhI mizh nar. Nauk.-prakt.konf. «Informatsijni tehnolohiji: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya – Kharkiv – traven'-.2013.-Ch.1. - 1P 4. Avtonomova L.V., Isakov S.N. *Upravlenie parametrami tehnologicheskogo processa strukturnosv'jazanoj akusticheskoy sistemy* Vostochno-evropejskij zhurnalпередовых технологий. - Kharkov, 2008. - No 1/5 (31-2008). - PP. 3-6. Print. 5. Holopov Ju.V. *Ul'trazvukovaja svarka plastmass i metallov.* Leningrad: Mashinostroenie, 1988. - 221 p. Print. 6. Gorjacheva I.G. Dobychin M.N. *Kontaktnye zadachi v tribologii.* - Moscow: Mashinostroenie, 1998.- 256 p. Print. 7. Matveev V. V. *Dempfirovanie kolebanij deformiruemyh tel.*- Kiev: Naukova dumka, 1985.- 264p. Print. 8. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena.* — Izd. 5-e pererab. i dop. — Moscow: Atomizdat, 1979. - 416 p. Print. 9. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. *Chislen-noe modelirovanie processov teplo- i masoobmena.* – Moscow: Nauka, 1984. - 286 p. Print. 10. Isakov S.N. *Postroenie tribologicheskoy sistemy ul'trazvukovoj svarki/* Visnyk NTU «KhPI». Zb. nauk. prats'. Seriya: Dynamika i mitsnist' mashyn. – Kharkov : NTU «KhPI». - 2013. – No63(1036) . – PP. 55 –59. Print.

Поступила (received) 24.03.2015

Исаков Сергей Николаевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: si@manoilgroup.com;

Марусенко Светлана Ивановна – научн. сотр. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: svivmar@mail.ru.