МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

DOI: https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.003
УДК 539.376

С.М. Дяченко [1], аспірант, **Т.А. Красовський** [2]
[1] Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна,03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15
тел. +38 (067) 505 90 43, e-mail: sergiydiachenko@gmail.com;
[2] Київський академічний університет МОН і НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Академіка Вернадського, 36
тел. +38 (097) 367 11 84, e-mail: taraskras@gmail.com

Моделювання режимів керування технологічним обладнанням при ультразвуковому зварюванні полімерів

Розглянуто два режими керування технологічним обладнанням для ультразвукового зварювання полімерів: режим з підтримкою постійного часу та режим підтримки постійної енергії при роботі ультразвукового генератора. Показано переваги роботи коливальної системи в режимі підтримки постійної енергії. Розроблено та виготовлено стенд для моделювання процесів зварювання. Наведено приклад технологічного обладнання яке було виготовлено по результатам моделювання режимів зварювання.

К л ю ч о в і с л о в а: ультразвукове зварювання, коливальна система, ультразвуковий генератор, ФАПЧ схема.

Як показують експертні оцінки [1—3], ультразвукове зварювання є найбільш перспективним засобом з'єднання полімерів. Це обумовлено рядом факторів таких, як часткова чи повна автоматизація технологічного процесу, забезпечення високої якості з'єднання та можливість проведення потокового контролю, зниження трудомісткості операцій та загальних енерговитрат, різке підвищення культури виробництва.

Технологічне обладнання для ультразвукового зварювання полімерів базується на використанні високо добротних коливальних систем (КС).

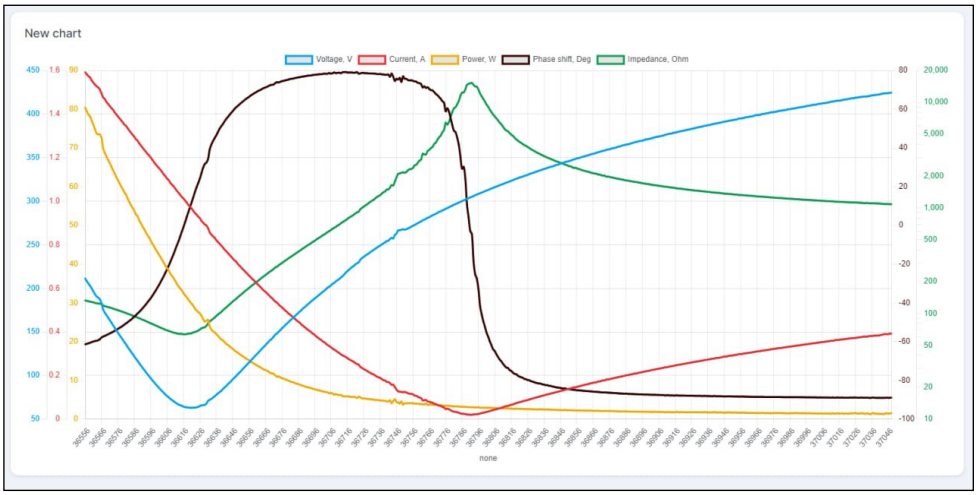
КС складається з електромеханічного перетворювача (в сучасному обладнанні використовуються п'єзокерамічні перетворювачі) та, як мінімум, одного пасивного елементу, який виконує функцію узгодження механічних імпедансів електромеханічного перетворювача та технологічного об'єкту зварювання. Друга важлива частина технологічного обладнання — це ультразвукове джерело живлення, яке ще називають ультразвуковий генератор (УЗГ). УЗГ живить КС, яка перетворює електричну енергію мережевої частоти в механічну енергію коливань з ультразвукової частотою та передає цю енергію до технологічного об'єкту навантаження КС.

Для ефективної передачі енергії від перетворювача до об'єкту технології КС повинна працювати в режимі резонансу, тобто всі елементи КС повинні бути налагоджені на одну резонансну частоту. Для підсилення ефективності роботи КС всі її складові частини виготовляють з матеріалів, які мають невеликий коефіцієнт внутрішніх втрат (для пасивних елементів — це тангенс механічних втрат, для активних елементів — це додатково п'єзоелектричні та діелектричні втрати). При таких умовах КС має достатньо велике значення механічної добротності, а це означає достатньо вузьку полосу робочих частот, тобто допустиме відхилення робочої частоти від резонансної обмежено діапазоном частот на рівні половини максимуму потужності.

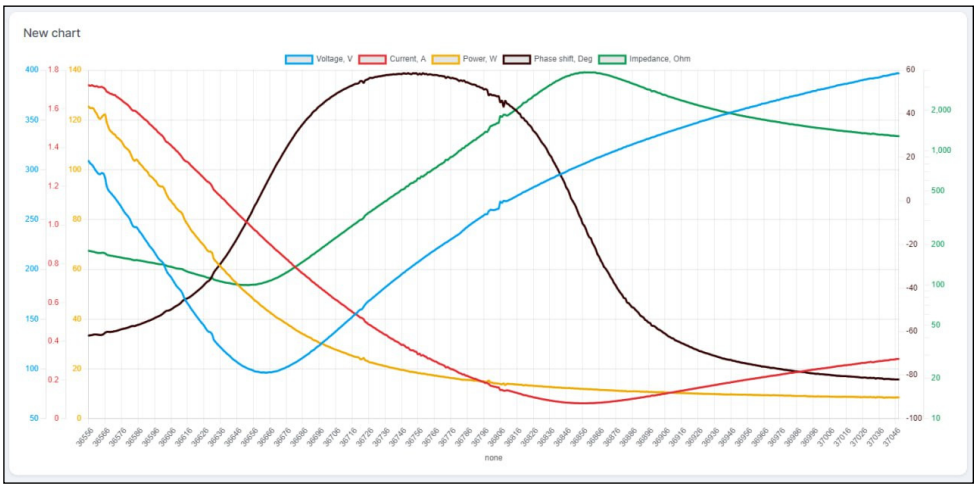
В процесі роботи КС відбувається навантаження об'єктом технології, тобто система демпфірується, внаслідок чого її характеристики суттєво змінюються порівняно зі станом роботи без навантаження. На рис.1 наведено залежності дійсних значень характеристик КС від частоти без навантаження (*а*) та значень характеристик КС, яка знаходиться під дією статичного навантаження (*б*) [4].

При навантаженні КС, суттєво зменшується її добротність на резонансних частотах, наприклад, на частоті антирезонансу добротність зменшується з 1256 до 18,6 одиниць. Знижується резонансна частота та деформується фазова характеристика КС, тобто збільшується фазовий зсув між струмом та напругою КС.

В процесі роботи КС відбувається передача коливальної потужності в термопластичну деталь. В результаті цього навантаження стан деталі змінюється з пружного до в'язко-текучого під впливом вібророзігріву. При цьому відбувається зміна характеристик КС в залежності від навантаження. Для підтримки режиму резонансу в процесі роботи збуджуюча сила та переміщення частинок КС повинні підтримувати між собою постійну фазу зсуву коливань. Аналогами збуджуючої сили та переміщення, з електричної сторони КС є електричні напруга та струм. Беручи до уваги, що елемент навантаження на КС має комплексний імпеданс, то і величини електричної



а



б

Рис. 1. Частотні характеристики залежності ненавантаженої КС від частоти без навантаження (*а*) та статично навантаженої КС (*б*): імпеданс — зелена крива, фаза між вихідними напругою та струмом — чорна крива, вихідна напруга — блакитна крива, вихідний струм — червона крива, вихідна потужність — жовта крива

напруги та струму на виході УЗГ будуть мати комплексний характер. УЗГ для підтримки резонансного режиму роботи має реагувати на зміну зсуву фази внаслідок технологічного навантаження та компенсувати цей додатковий зсув до початкового рівня і підтримувати максимальну передачу коливальної потужності в зону зварювання.

Практично час зварювання триває від частки секунди до декількох секунд, тому задача стеження за фазою напруги та струму залежить від

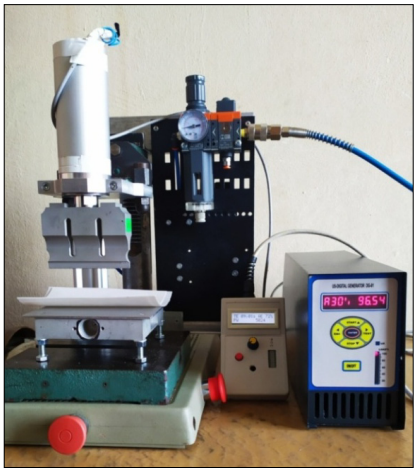


Рис. 2. Дослідне ультразвукове зварювальне обладнання з цифровим УЗГ та пульт керування на базі мікроконтролера

швидкості роботи схеми фазово-амплітудного підлагодження частоти (ФАПЧ) УЗГ. Схема ФАПЧ відслідковує розбіг фази напруги та струму на вході КС та корегує робочу частоту УЗГ таким чином, щоб вихідна потужність КС була максимальною на протязі циклу зварювання, тобто корегує зсув фази. Якщо схема ФАПЧ має певний час інерційного реагування на зміну навантаження КС, то робоча частота УЗГ відхиляється від частоти електромеханічного резонансу КС, при цьому зменшується потік енергії до деталі і може початися процес полімеризації матеріалу. Коли ФАПЧ узгодить різницю фаз, знов підвищиться потік енергії до деталі та знов почнеться процес плавлення матеріалу. Такий коливальний процес подачі енергії до технологічного навантаження суттєво впливає на якість процесу зварювання полімерів. Коли технологічний процес керується в режимі постійного часу (це коли час роботи УЗГ керується таймером) маємо суттєву залежність стабільного потоку зварювальної енергії, тобто енергії, яка потрапляє в зону зварювання деталей від швидкості роботи ФАПЧ. Якщо розглядати в цьому сенсі аналогові УЗГ, то цілком зрозуміло, що вони не придатні до точних робіт по зварюванню полімерів. Це пояснює низьку ціну на таке обладнання, яке потрапляє на ринок України, наприклад, з Китаю.

Цифрові УЗГ мають значні переваги порівняно з аналоговими в плані роботи ФАПЧ, але і тут має місце вибір схемного рішення для ФАПЧ. Швидкісна ФАПЧ — не дешева частина УЗГ. В якості компромісного рішення при використанні середньо-швидкісного ФАПЧ пропонується перехід від режиму керування роботою УЗГ по часу до режиму керування по енергії, тобто вимірювати кількість енергії на виході УЗГ під час зварювання. В результаті роботи УЗГ в режимі контролю енергії змінюється робочий час активної фази УЗГ в залежності від зовнішніх факторів при навантаженні.

Розроблено дослідне обладнання для моделювання режимів керування процесом ультразвукового зварювання полімерів на базі мікроконтролера. На рис. 2 показано обладнання, виготовлене для дослідження двох режимів керування: с постійним часом та постійною енергією, яке скла-

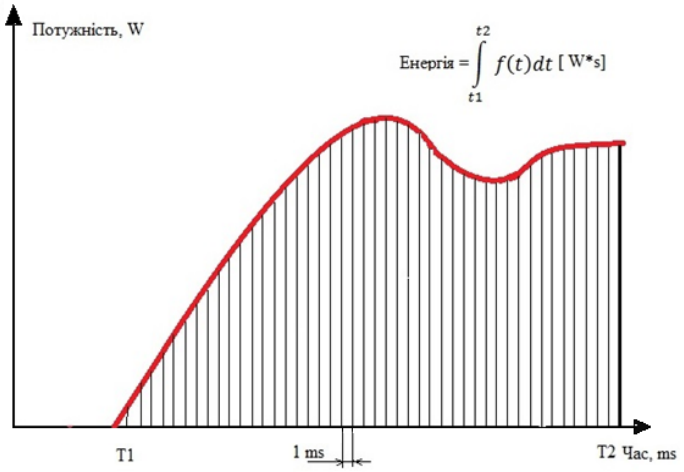


Рис. 3. Крива вихідної потужності, що ілюструє принцип розрахунку енергії

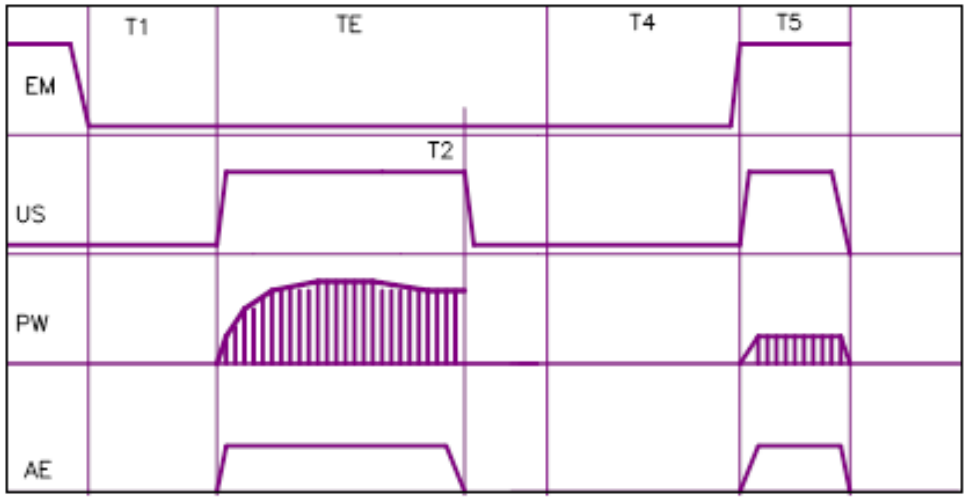


Рис. 4. Діаграма циклічного процесу зварювання в режимі контроля постійної енергії

дається з пневматичного пресу, КС, цифрового УЗГ та пульту керування на базі мікроконтролера.

Ідея режиму підтримки постійної енергії базується на наступному принципі. Оскільки УЗГ та КС налаштовані на роботу на частоті, близькій до частоти електромеханічного резонансу, то напруга живлення КС є пропорційною механічній амплітуді коливання інструменту. Вона підтримується стабільною на протязі всього періоду зварювання [4, 5]. Тоді інтеграл добутку дійсних величин струму та напруги КС за певний інтервал часу буде дорівнювати енергії зварювання (див. рис. 3).

Рис. 5. Зовнішній вигляд технологічного устаткування для ультразвукового зварювання деталей корпусів з матеріалу поліамід 66

Для виконання функцій цифрового контролю при обчислені енергії та математичної обробки процесу зварювання, а також для обслуговування периферії було використано мікропроцесорний контролер PIC18F4520 старшого сімейства даного класу компанії Microchip Technology Inc. (США). Відмінною рисою його є хороша спадкоємність різних сімейств: програмна сумісність (загальні засоби розробки, безкоштовна IDE MPLAB, загальні бібліотеки та стеки найбільш популярних протоколів передачі даних), сумісність по периферії, по напрузі живлення та широкі межі робочих температур.

Діаграма циклічного процесу роботи обладнання для зварювання в режимі контроля постійної енергії зварювання показана на рис. 4.

В процесі роботи установки пневмопривід (крива ЕМ) опускає елемент КС (сонотрод) на технологічну деталь. Наступний інтервал ТЕ — це зарезервований час роботи УЗГ. На інтервалі Т2 мікроконтролер вираховує затрачену потужність генератора та порівнює її з встановленою оператором енергією PW. Якщо енергія зварювання досягнула значення, встановленого оператором, ультразвук вимикається. На діаграмі — це момент закінчення інтервалу Т2 та момент вимкнення вихідної напруги УЗГ — АЕ, яка є еквівалентом механічної амплітуди сонотроду. Інтервал Т4 — це технологічний інтервал, відповідає часу витримки деталей під тиском після відключення ультразвуку. Інтервал Т5 — це теж технологічний інтервал для включення ультразвуку в момент, коли сонотрод відривається від деталей при підйомі КС. Іноді це корисно, наприклад, коли полімер липне до поверхні сонотроду.

На базі проведених робіт на макетному стенді розроблено технологічну установку для зварювання корпусів з матеріалу поліамід 66 (рис. 5).

На цій установці реалізовано режим зварювання з постійним часом та з постійною енергією. На рис. 6, *а*, наведено первинні технологічні параметри зварювання нового виробу, що виконуються в режимі постій-

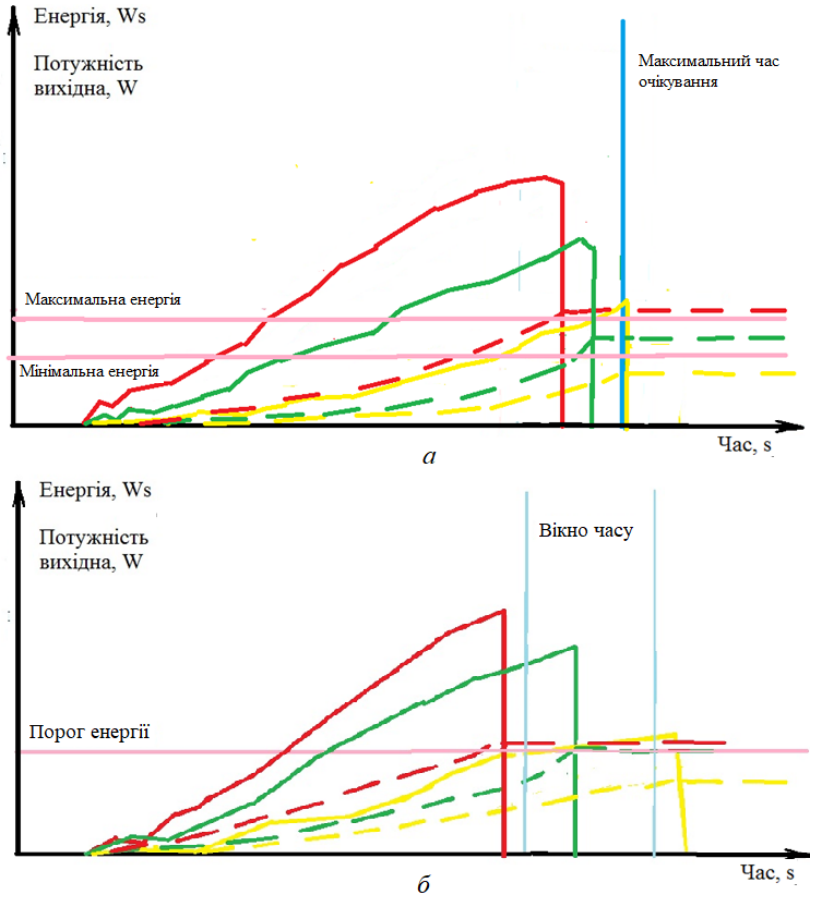


Рис. 6. Графіки потужності та енергії в режимі роботи з постійним часом (*а*) та в режимі роботи з постійною енергією (*б*): потужність процесу (суцільна крива), енергія зварювання (уривчаста крива), оптимальний режим зварювання (зелена крива) червона крива показує, що енергія перевищує заданий інтервал, а жовта крива — що недостатньо енергії для даного процесу

ного часу. Декількома пробними зварюваннями на різних режимах визначають оптимальний діапазон енергії зварювання, так зване «вікно енергії». Наступний етап — це перехід роботи УЗГ до режиму з постійною енергією (див. рис. 6, *б*) [6]. По результату попередньої роботи УЗГ встановлюється робоче значення діапазону енергії, при якому виконуються якісні зварювання деталей. Результат процесу зварювання можна контролювати за результуючим вікном часу, яке відповідає попередньо встановленому вікну енергії якісних зварок.

Висновки

Робота обладнання в режимі контролю постійної енергії виявляє суттєві переваги порівняно з режимом контролю постійного часу:

• стає можливим набагато точніше контролювати дестабілізуючі фактори процесу зварювання, такі як коливання електричних параметрів КС + УЗГ, спонтанну зміну механічних та фізичних параметрів технологічного навантаження КС. Після кожного циклу зварювання на екрані контролера відображається енергія зварювання та дійсний час зварювання;

• можливість організувати постійний технологічний контроль якості зварювання в безперервному режимі, використовуючи «вікна часу» та «вікна енергії»;

• можливість розвинути режими контролю за процесом зварювання, використовуючи алгоритм обчислювання постійної енергії для розробки режиму контролювання пікової потужності зварювання;

• розширяється функціональний діапазон використання обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сенченков И.К. Модальная классификация и проектирование сонотродов для ультразвуковой обработки материалов. *Акустичний вісник.* 1998.Т.1, № 4. С. 55—64
2. What Is Ultrasonic Welding? Joining/Reforming Thermoplastics. *Global Leader in Plastic Welding Technologies | Dukane*. URL: https://www.dukane.com/resources/our-processes/ultrasonic-plastic-welding (дата звернення: 27.07.2023).
3. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л., 1988. 224 с.
4. Piezoelectric Converters Modelling and Characterization | MPI Ultrasonics — sonic and ultrasonic processing technology. *Innovative Developments in Sonic & Ultrasonic, Liquid, Solid and Powder Materials Processing, Machining, Sintering, Cleaning, Sonochemistry, Food and Pharmaceutic Industry, and much more... thanks to MMM technology | MPI Ultrasonics — sonic and ultrasonic processing technology*. URL: https://www.mpi-ultrasonics.com/content/piezoelectric-converters-modelling-and-characterization (дата звернення: 27.07.2023).
5. Красовський Т.А., Василенко В.І. Цифровий аналізатор електромеханічних параметрів ультразвукових коливальних систем. *Вісник НТУУ «КПІ» Серія Приладобудування*. 2017. Т. 1, № 53. С. 44—49.
6. Дяченко С.М. Ультразвуковая сварка деталей из термопластов. *ММ Деньги и технологии*. 2003. № 7, 8. С. 19—25.

Отримано 21.06.2023

REFERENCES

1. Krasovsky T.A., Vasilenko V.I. Digital analyzer of Senchenkov I.K. Modal classification and design of sonotrodes for ultrasonic processing of materials. *Acoustic visnik*. 1998. Vol. 1, No. 4. pp. 55-64.
2. What Is Ultrasonic Welding? Joining/Reforming Thermoplastics. *Global Leader in Plastic Welding Technologies | Dukane*. URL: https://www.dukane.com/resources/our-processes/ultrasonic-plastic-welding (date of access: 27.07.2023).
3. Kholopov Yu.V. Ultrasonic welding of plastics and metals. L., 1988. 224 p.

4. Piezoelectric Converters Modelling and Characterization | MPI Ultrasonics - sonic and ultrasonic processing technology. Innovative Developments in Sonic & Ultrasonic, Liquid, Solid and Powder Materials Processing, Machining, Sintering, Cleaning, Sonochemistry, Food and Pharmaceutic Industry, and much more... thanks to MMM technology | MPI Ultrasonics — sonic and ultrasonic processing technology. URL: https://www.mpi-ultrasonics.com/ content/piezoelectric-converters-modelling-and-characterization (date of access: 27.07.2023).
5. Krasovsky T.A., Vasilenko V.I. Digital analyzer of electromechanical parameters of ultrasonic oscillating systems. Bulletin of NTUU "KPI" 2017. V. 1, No. 53. S. 44-49.
6. Diachenko S.M. Ultrasonic welding of parts from thermoplastics. MM Money and technology. 2003. No. 7, 8. pp. 19-25.

Received 21.06.2023

S.M. Diachenko, T.A. Krasovsky

MODELING OF CONTROL MODES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT DIRING ULTRASONIC WELDING OF POLYMERS

Two control modes of technological equipment for ultrasonic welding of polymers are considered: a mode with support of constant time and a mode of support of constant energy during the operation of the ultrasonic generator. The advantages of operation of the oscillating system in the constant energy maintenance mode are shown. A stand for modeling welding processes was developed and manufactured. An example of technological equipment that was manufactured based on the results of simulation of welding modes is presented.

K e y w o r d s: ultrasonic welding, oscillating system, ultrasonic generator, PLL scheme.

ДЯЧЕНКО Сергій Михайлович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1983 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — комп'ютерне моделювання, розробка та виготовлення технологічного ультразвукового обладнання.

КРАСОВСЬКИЙ Тарас Анатолійович, зав. лабораторією нових методів аналізу матеріалів Київського академічного університету МОН і НАН України. У 1978 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — комп'ютерне моделювання, розробка та виготовлення приладів дослідження металів з використанням ультразвукової технології.