

УДК 62-192(075)

А.С. Гринченко, д-р техн. наук, проф.

А.И. Алферов, канд. техн. наук, доц.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко
(Харьков, Украина, nadezhnost@ukr.net)*

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

Прогнозирование надежности элементов машин при проектировании имеет целью, прежде всего, избежать возникновения в условиях эксплуатации механических отказов, обусловленных влиянием силового механического взаимодействия элементов между собой и со средой. При этом особое внимание должно быть уделено внезапным механическим отказам в связи с тем, что их развитие, в отличие от постепенных отказов, как правило, не поддается индивидуальному диагностированию и предупреждению. Кроме того, как показывает практика, внезапные отказы чаще могут происходить в начальный период эксплуатации техники, что отрицательно сказывается на ее конкурентоспособности при внедрении на рынок.

Термин "экстремальные нагрузки" применяется далее в том смысле, что рассматриваются максимумы различных механически нагружающих факторов или их сочетаний, которые потенциально способны даже в результате одного нагружения привести к внезапной потере элементом несущей способности. Современные компьютерные методы анализа напряженно-деформированного состояния элементов машин различной геометрической формы позволяют инженеру эффективно оценивать величины нагрузок и напряжений, которые в соответствии с принятой расчетной схемой нагружения могут привести к потере несущей способности у элемента. Однако для прогнозирования надежности такой детерминированный подход недостаточен. Необходимо учитывать, что в условиях эксплуатации величины действующих экстремальных нагрузок имеют существенное случайное рассеивание, а случайная изменчивость механических характеристик материалов и технологических режимов изготовления элементов в совокупности приводит к случайности величины несущей способности.

Если экстремальные нагрузки и несущие способности элементов случайны и распределены по закону Вейбулла [1], то вероятность безотказной работы элемента при m -кратном экстремальном нагружении определяется по формуле

$$R_m = \prod_{i=1}^m \frac{i\bar{K}^b}{i\bar{K}^b + 1},$$

где \bar{K} – коэффициент запаса, определяемый как отношение средних значений

несущей способности и экстремальных нагрузок; b – общий у этих величин параметр формы распределений.

Поскольку экстремальные нагружения относятся к редким случайным событиям [2], то прогнозирование показателей надежности, в зависимости от наработки, целесообразно проводить в предположении, что случайный поток экстремальных нагружений является пуассоновским.

Если поток экстремальных нагружений стационарный с постоянной интенсивностью $\omega_0 = 1/T_0$, то вероятность безотказной работы в зависимости от наработки t определяется выражением

$$R(t) = \int_0^1 e^{-\omega_0 t [1 - F_1(G)]} dG,$$

в котором $F_1(G)$ – функция единичного распределения нагрузки; G – аргумент, являющийся функцией распределения несущей способности.

В частном случае, если экстремальные нагрузки и несущая способность являются подобными случайными величинами и распределены по закону Вейбулла с одним и тем же параметром формы b [3], то можно получить аналитическое выражение для прогнозирования вероятности безотказной работы в зависимости от наработки. В этом случае функция единичного распределения нагрузки $F_1(G) = 1 - (1 - G)^{\bar{K}^b}$, а вероятность безотказной работы

$$R(t) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\bar{K}^b}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\bar{K}^b}, \omega_0 t\right)}{(\omega_0 t)^{\frac{1}{\bar{K}^b}}} + e^{-\omega_0 t},$$

где $\Gamma(\alpha, \omega_0 t) = \int_{\omega_0 t}^{\infty} e^{-y} y^{\alpha-1} dy$ – неполная гамма-функция.

1. Гринченко А.С. Модели прогнозирования прочностной надежности элементов машин при однократном разрушении. *Вісник ХДТУСГ*. 2000. Вип. 4. С. 21-27.
2. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций. Светлицкий В.А. (ред.). Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.
3. Гринченко А.С., Алферов А.И. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок. Харьков: ТОВ «Планета-Принт», 2017. 136 с.

УДК 669.13 (03)

В.С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України
(Київ, Україна, doros55v@gmail.com)

ТЕРМООБРОБКА ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПРИ РАННЕМ УДАЛЕНИИ ИХ ИЗ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

Обзор информации по теме «Научно-технологические основы создания экономнолитых конструкций с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик на основе высокопрочных чугунов (ВЧ) с использованием комплексного физико-химического воздействия на структуру расплава и процесс кристаллизации при регулируемых параметрах давления, вакуума и низких температур показал достижения процессов термообработки ВЧ [1-3]. В частности, ВЧ после термообработки – Austempered Ductile Iron (ADI) с $\sigma_{\text{в}}=1000\dots1500$ МПа конкурентоспособен по сравнению с конструкционной сталью (рис. 1, а) [2], а влияние температуры $T^{\circ}\text{C}$ выдержки отливок из ВЧ в процессе изотермической закалки на его структуру показано на рис. 1, б [3].

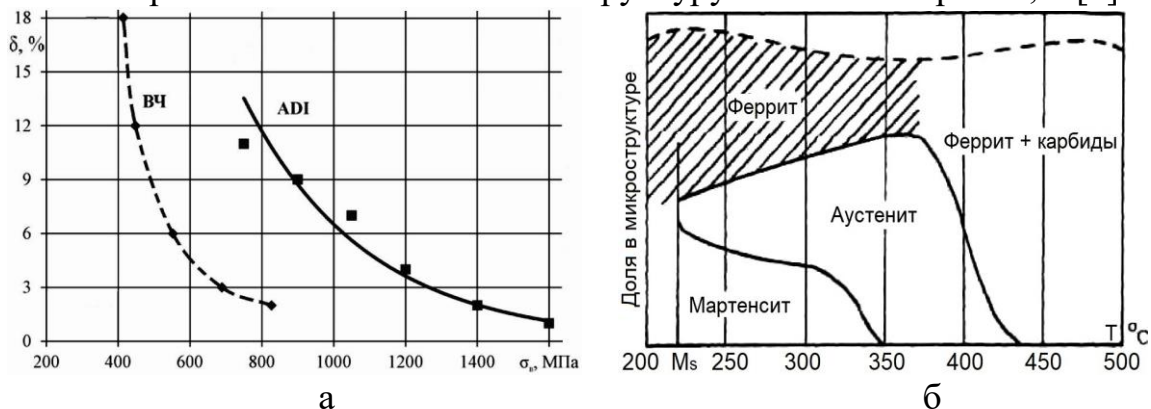


Рис. 1. Механические свойства (а) [2] и структурообразование ВЧ (б) [3]

Во ФТИМС НАН Украины предложен способ литья ВЧ по газифицируемым моделям в сочетании с термообработкой отливок при удалении их из литейной песчаной формы в аустенитном состоянии [4]. Отливки извлекают из литейных форм при температуре 850-1000 $^{\circ}\text{C}$ и в течение 5-15 с переносят их на закалку с изотермической выдержкой при температуре, определяемой требуемым типом структуры [3], например, нижний или бескарбидный бейнит-аусферрит [4].

1. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Тенденции мирового и украинского рынков отливок и развития технологии литья к 2016 г. *Металл и литье Украины*. 2018. № 1-2. С. 29-32.

2. Новиков А.А., Дробышевский П.С., Тюрин С.А., Чумак Д.С. Механические и эксплуатационные свойства высокопрочного чугуна марки ВЧТГ. *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2018. № 1. С. 61 - 69.

3. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Литейные сплавы и технологии. Минск: Беларуская навука, 2012. 442 с.

4. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну з кулястим графітом: пат. 123731 Україна. МПК В22 D7/00, В22 D23/00/ Дорошенко В.С., Шинський В.О.; заявл. 04.08.2017. Опубл. 12.03.2018, бюл. № 5.

УДК 621.74.02: 621.74.045

В.С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
(Київ, Україна, doros55v@gmail.com)*

ЕКСПРЕС-ТЕРМОАНАЛІЗ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

У розвиток способу термоаналізу (ТА) металевого розплаву, що твердне, шляхом порівняння кривих температури досліджуваного сплаву і сплавів із відомими властивостями (еталонних) розроблено різновид ТА з переносним пробовідбірником (ПВ) – маленької піщаної форми, отриманої способом лиття за газифікованими моделями (ЛГМ). Разову модель з пінополістиролу для проби з чавуну (маса металу 250-450 г) зі вставленою термопарою формували в сухому піску в контейнері, що вакуумували. Вакумування при ЛГМ створює градієнт тиску, що зміцнює пісок, крім того, застосували для заливання ПВ розплавом металу вакуумним всмоктуванням. Швидке заливання, запис температур фазових перетворень тверднучого розплаву при порівнянні з еталонними кривими за допомогою комп'ютера дозволив віднести такий ТА до експрес-аналізу, який відпрацювали в лабораторії з побутовим пілососом, на сопло металеві (змінної довжини) трубки від якого насаджували піщану форму ПВ. Цю форму в металевому контейнері ємністю 0,5-0,7 літра в залежності від розміру проби формували за ЛГМ процесом. У дні контейнера виконували отвір і співвісно з ним приварювали до дна патрубков для насадки на сопло трубки пілососа. З середини контейнера цей отвір закривали газопроникним фільтром, що не пропускає пісок. Цей контейнер був як одна з мініатюрних копій контейнерної опоки для ливарних вакуумованих піщаних форм. При формовці на дно в контейнері засипали шар формувального піску, ставили модель проби з термопарою, вільні кінці якої кабелем виводили за межі контейнера уздовж або усередині трубки пілососа у напрямку до переносного приладу. Потім засипали суміш до верху контейнера і герметизували його торець синтетичною плівкою з контактом до торця моделі. Формували ПВ, наближаючи затвердіння проби в ньому до умов формовки товарного вилівка. Торцем вакуумованого ПВ, покритим плівкою, торкали в печі чи ковші поверхню розплаву металу, який газифікував плівку, модель і заміщав останню в ПВ – вакуумним всмоктуванням виливали пробу. Сигнал – спалах лампочки чи звуковий синхронно з електричним сигналом термопари підтверджував заповнення ПВ для припинення контакту його з металом. ПВ ставили на підставку торцем догори і відключали вакуумування, забезпечуючи запис кривої «температура – час» охолодження металу проби в піску. Такий ПВ вакуумного всмоктування зручний не тільки для ТА, а й з довгою трубкою – для відбору проб з великих печей, міксерів і мартенів, навіть з металом на дні без його зачерпування традиційними ковшиками і переливанні в традиційні ПВ з попутною втратою температури і попереднім нагріванням оснастки. Відбір металу з поверхні придатний для ТА рідко-твердих сплавів при тиксолитті.

УДК 539.3

Ю.Г. Єфремов¹, канд. техн. наук

О.В. Депарма¹

В.Й. Цибулько¹

М.Г. Шульженко, д-р техн. наук, проф.

Н.Г.Гармаш², канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

І.І. Мележик², канд. техн. наук

¹ТОВ «СКБ «Вібрації та ресурсу»

(Харків, Україна, iefremov.ua@gmail.com)

²Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

(Харків, Україна, shulzh@ipmach.kharkov.ua)

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ДАТЧИКИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ ОБЕРТОВИХ ТА НЕОБЕРТОВИХ ЧАСТИН МЕХАНІЗМІВ

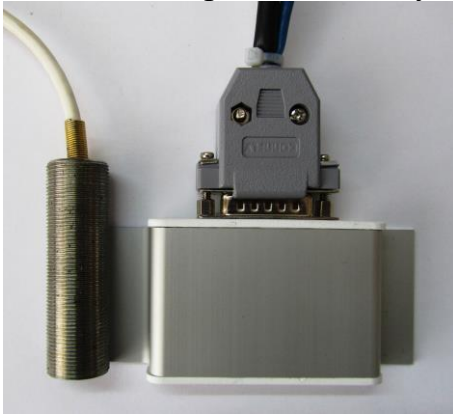
Підвищення надійності і безпеки експлуатації енергоблоків може вирішуватися шляхом використання засобів діагностування вібраційного стану з визначенням небезпечних несправностей. На вірогідність оцінки вібраційного стану агрегатів істотно впливає точність і надійність технічних засобів і програмно-методичного забезпечення із визначення й контролю параметрів вібрації. Тому вирішення задачі зниження похибки вимірювання у робочому діапазоні температур, розширення частотного діапазону вимірювання та підвищення надійності засобів діагностування має важливе значення. Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки дозволяє створити так звані інтелектуальні датчики вимірювання [1, 2] з мікроконтролером із функціями: цифрової обробки сигналів; автоматичної компенсації впливу параметрів навколишнього середовища; автоматичної перевірки справності функціонування (самодіагностування); дистанційного конфігурування (діапазону вимірювань, одиниць вимірювань); передачі інформації з використанням протоколів промислових мереж, що забезпечують в повному обсязі необхідний рівень метрологічних та експлуатаційних характеристик в режимі реального часу. На цей час на ринку України відсутні інтелектуальні датчики вібрації вітчизняного виробництва.

Авторами створено наступні інтелектуальні датчики вібрації: акселерометр (датчик віброприскорення), велосіметр (датчик віброшвидкості) і проксіметр (датчик вібропереміщення).

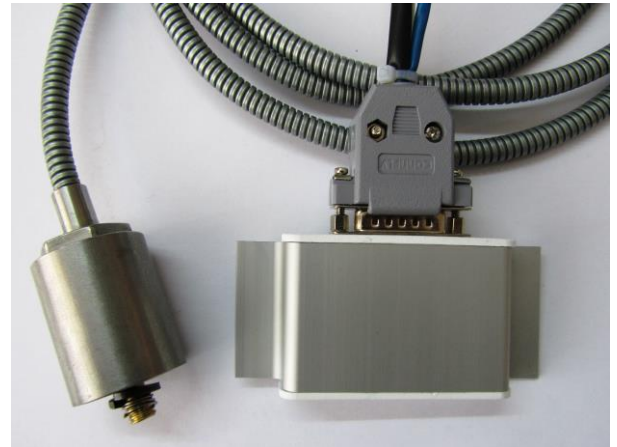
Проксіметр (рис. 1) рекомендується для оцінки вібраційного стану обертових частин механізмів ТЕС і ТЕЦ та інших промислових об'єктів. Проксіметр має безконтактний вихорострумний первинний перетворювач та функціональний перетворювач для обробки сигналу. Діапазон частот вимірювання проксиметром обертових частин обладнання від 0,04 до 1000 Гц. Діапазон вимірювання розмаху вібропереміщення від 20 мкм до 1000 мкм із дискретністю 1 мкм, діапазони вимірювання переміщення від 0 мм до 4 мм, від

0 мм до 10 мм, від 0 мм до 100 мм. Проксіметром визначаються розмах вібропереміщення, амплітуди і фази $\frac{1}{2}$, 1, 2 гармонічних складових вібропереміщення, сигналізується про перевищення розмаху вібропереміщення і низькочастотної вібрації заданих рівнів та про різку зміну (стрибок) вібрації.

Велосіметр та акселерометр (рис. 1) призначаються для оцінки вібраційного стану необертюваних частин механізмів ТЕС і ТЕЦ та інших промислових об'єктів. Велосіметр та акселерометр складаються з контактної вихорострумівого первинного перетворювача та функціонального перетворювача для обробки сигналу.



проксіметр



велосіметр, акселерометр

Рис. 1. Зовнішній вигляд інтелектуальних датчиків вібрації

Діапазон частот вимірювання велосіметром та акселерометром від 2,5 до 1000 Гц. Діапазон вимірювання велосіметром середньо-квадратичного значення віброшвидкості 0,5 – 16 мм/с. Діапазон вимірювання акселерометром амплітуди віброприскорення 0,5 – 50 м/с².

Велосіметром визначаються спектральні складові та середньоквадратичні значення вібрації у заданих смугах частот вимірювання з сигналізацією про перевищення середньоквадратичних значень віброшвидкості заданих рівнів та про різку зміну (стрибок) вібрації.

Акселерометром визначаються спектральні складові віброприскорення у заданих смугах частот вимірювання з сигналізацією про перевищення амплітуди віброприскорення заданих рівнів та про різку зміну (стрибок) вібрації.

Датчики випробувано на агрегатах ТЕС України і використано для оцінки їх вібраційного стану. Створені інтелектуальні датчики можуть використовуватися для оцінки вібраційного стану обертових і необертюваних частин механізмів ТЕС і ТЕЦ та інших промислових об'єктів.

1. Шульженко М.Г., Єфремов Ю.Г., Депарма О.В., Цибулько В.Й. Датчик віброшвидкості з функціями контролю і аналізу вібраційних параметрів енергообладнання. *Вісник НТУ «ХП»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2017. № 8(1230). С. 63-68. doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.09.

2. Шульженко М.Г., Гармаш Н.Г., Єфремов Ю.Г., Депарма О.В., Цибулько В.Й. Інтелектуальний датчик вібропереміщення з функціями контролю й аналізу вібраційних параметрів енергообладнання. *Вісник НТУ «ХП»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 11(1287). С. 40-46. doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.07.

УДК 539.4

А.П. Зінковський, д-р техн. наук, проф.

В.В. Харченко, акад. НАН України

*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України
(Київ, Україна, Zinkovskii@ipp.kiev.ua)*

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ДИНАМІКИ ТА МІЦНОСТІ ЛОПАТКОВОГО АПАРАТУ СУЧАСНИХ ТУРБОМАШИН

Одним з пріоритетних наукових напрямків Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України (далі – Інститут), починаючи з дати його створення, є розробка методів та засобів підвищення надійності та довговічності конструктивних елементів та вузлів турбомашин, в першу чергу авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД).

Лопатковий апарат робочих коліс турбомашин відноситься до найбільш навантажених їх вузлів. При цьому досвід створення АГТД свідчить, що більш ніж половина дефектів, які виявляються при їх доводці, має вібраційне походження і більша їх частина приходить на лопатковий апарат.

Для вирішення актуальних науково-технічних проблем динаміки та міцності, які виникають на усіх етапах життєвого циклу турбомашин (проектування, доводка та виробництво), підвищення їх надійності та ресурсу наукові дослідження в Інституті проводяться за такими напрямками:

- розробка методів та експериментальних засобів визначення дисипативних властивостей матеріалів і конструкцій, в т.ч. в полі відцентрових сил, аеродемпфірування лопаток та методів підвищення вібраційної надійності лопаткового апарату;

- розробка методів та проведення експериментальних досліджень прогнозування повзучості, довготривалої міцності та залишкової довговічності матеріалів різних класів;

- розробка методів та засобів випробувань на довговічність елементів конструкцій турбомашин в газових потоках та полі відцентрових сил, несівної здатності елементів з покриттями в екстремальних умовах:

- створення теорії накопичення втомних пошкоджень металів на основі врахування їх циклічної непружності і розробка методів втомного граничного стану матеріалів різних класів при мало- та багатоциклового навантаженні;

- визначення механічних властивостей матеріалів у широкому діапазоні умов навантаження та температури з дотриманням вітчизняних та міжнародних стандартів.

Для вирішення задачі істотного підвищення надійності і ресурсу лопаткового апарату робочих коліс в сучасному турбомашинобудуванні, враховуючи нагальну вимогу створення конкурентоздатних на світовому ринку турбомашин, останнім часом в Інституті набули розвитку дослідження з вирішення актуальної науково-технічної проблеми з розробки методів вивчення

напружено-деформівного стану лопаткового апарату робочих коліс турбомашин, як системи з конструктивною поворотною симетрією, в таких напрямках:

– визначення закономірностей впливу кристалографічної орієнтації монокристалічних матеріалів на напружений стан робочих лопаток турбін з урахуванням експлуатаційних режимів навантаження;

– розробка методик раціонального вибору параметрів поличного бандажування і визначення їх впливу на статичний і вібраційний стани робочих лопаток турбін;

– розробка методів прогнозування та дослідження стійкості до дозвукового флатеру лопаткових вінців компресорів;

– дослідження впливу експлуатаційних пошкоджень вінців лопаток на характеристики їх напружено-деформівного стану.

На основі даних проведених науково-дослідних робіт у зазначених наукових напрямках комплексного вивчення проблем міцності матеріалів і елементів та вузлів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів в умовах екстремального термосилового навантаження отримані нові фундаментальні результати, які узагальнені в багатьох монографічних виданнях, зокрема в [1], відзначені Державними преміями та іншими відзнаками.

Оснащення експериментальної бази Інституту сучасним випробувальним обладнанням, а саме: сервогідролічними машинами Instron 8802 (Великобританія) та Biss-10 (Індія), резонансною машиною RUMUL TESTRONIC 50kN (Швейцарія), дало можливість створити банк даних механічних характеристик широкого класу нових авіаційних матеріалів з урахуванням умов навантаження та температури з дотриманням вітчизняних та міжнародних стандартів.

Результати проведених експериментальних та розрахункових досліджень є істотним внеском у розвиток актуального наукового напрямку з розробки методів вивчення напружено-деформівного стану таких відповідальних вузлів АГТД як робочі колеса компресорів та турбін і забезпечення їх ресурсу. Запропоновані рекомендації знайшли реальне впровадження на провідних двигунобудівних підприємствах України – ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «МОТОР СІЧ» при проектуванні перспективних та доводці серійних газотурбінних двигунів, таких як Д-436Т1, Д-436ТП, Д-436-148, Д-27 та інших, і знайшли безпосереднє використання при створенні нових зразків двигунів.

1. Трощенко В.Т., Курият Р.И., Лебедев А.А. [и др.] Прочность материалов и конструкций. Киев: Академперіодика, 2006. 1076 с.

УДК 621.74.045

В.П. Кравченко, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

В.О. Шинський

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
(Київ, Україна, v_kram@i.com.ua)*

НОВІТНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

В останні роки встановлено, що має місце наявність зменшення опору металу деформуванню під впливом імпульсного електричного струму та електромагнітного збудження металу. У зв'язку з цим, становить значний інтерес дослідження еволюції структури залізобуглецевих сплавів при сумісній дії сил механічного та електричного походження.

Донедавна вважалось, що герметичність сталевих і чавунних виливків обумовлюється розмірами, формою пористості у структурі чавуну. Тобто, чим менше пористості і дефектів структури, тим вище герметичність і тим нижчі показники газопроникності. Втрата герметичності насамперед є результатом силової взаємодії рідини з поверхнею вилівка і наявності у структурі литої деталі внутрішніх залишкових, а також наведених монтажних напружень [1, 2].

Таким чином, розглядаючи проблему виникнення експлуатаційної транзитної пористості, насамперед, в чавунах, необхідно зазначити, що вона має теоретичні і практичні аспекти. Особливий інтерес мають дослідження герметизаційної стійкості виробів із залізобуглецевих сплавів при наявності графітових включень. Детальне вивчення цього механізму впливу графітових включень, як дискретних особливостей у суцільному середовищі вихідного матеріалу, дасть можливість не тільки якісно оцінити вище зазначені процеси, але і розробити підходи для усунення небажаних наслідків і явищ, розглядаючи вилівок, як неперервно-дискретну систему з тільки їй притаманними якісними характеристиками і особливостями.

Важливо відмітити, що дослідження ефекту електродинамічного впливу в технологіях фінішних операцій обробки залізобуглецевих структур дасть можливість розробляти новітні технологічні методи по зміцненню металевих пористих структур з можливістю надавати одержаним деталям нових експлуатаційних властивостей. Використання електродинамічного впливу дасть також можливість покращувати реалізацію необхідних технологічних процесів та стабілізуючої герметизації виробів, для яких неефективне застосування традиційних методів, що використовуються при обробці деталей.

1. Русаков П.В., Шинский О.И. Остаточные напряжения в отливках головок блока цилиндров и способ их уменьшения динамическим нагружением. *Процессы литья*. 2000. №3. С. 92-94.

2. Спосіб формоутворення: пат. 5451 Україна, МПК В22С 9/04 / Шинський О.Й., Русаков П.В., Шинський І.О., Яковишин О.А. Опубл. 15.03.2005. Бюл. №3. 3 с.

УДК 534.6.08

О.М. Мокрий, канд. фіз.-мат. наук

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(Львів, Україна, tokotom2323@gmail.com)*

ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ МЕТАЛУ

Акустичні властивості металів та сплавів є чутливими до деградаційних явищ, які в них відбуваються під дією різноманітних чинників. Використання змін швидкості акустичних хвиль дозволяє діагностувати стан металу ще до виникнення тріщин. Разом з тим, застосування швидкості поширення акустичних хвиль для діагностики стану металу ускладнюється наявністю багатьох чинників, які впливають на пружні модулі та густину металу. Тому для використання швидкості акустичних хвиль використовують калібрувальні залежності для зразків, що піддаються дії конкретних чинників.

Відзначимо, що хоча зміни цих величин, як правило, не перевищують кілька відсотків [1], наявність високоточних методик вимірювання швидкості дозволяє використовувати їх з діагностичною метою. Особливо зручним є застосування з цією метою поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) [2]. Це зумовлено тим, що на поверхні досліджуваної конструкції є доступ до ділянок, в яких можна збудити чи зареєструвати ПАХ. Першою чергою це дозволяє точно визначити відстань, яку проходить ПАХ, що необхідно для вимірювання її швидкості поширення. Також ПАХ дозволяють визначати розподіл швидкості на поверхні досліджуваного матеріалу. Такий розподіл величини швидкості ПАХ дозволяє оцінити вплив різноманітних чинників на стан металу, оскільки він часто є неоднорідним в елементі конструкції. Визначення розподілу швидкості ПАХ на поверхні матеріалу вимагає створення не тільки високоточних методик, але і методик, які мають високе розділення.

Розроблена методика визначення розподілу швидкості ПАХ на поверхні зразка із використанням контактного п'єзоелектричного перетворювача, в якого збуджуюча та реєструюча частини жорстко з'єднані між собою. Проведено вимірювання розподілу швидкості ПАХ в зразках виготовлених з маловуглецевої сталі, які були піддані пластичній деформації розтягу. Виявлено зменшення швидкості ПАХ в пластично деформованих ділянках, однією з причин появи якої є виникненням мікропор.

1. Скальський В.Р., Назарчук З.Т., Гірний С.І. Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструкційної сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. № 4. С. 68-75.

2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура стали и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

УДК:539.3/4:620.179.14

Є.П. Почапський, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

Н.П. Мельник

І.М. Коблан

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
(Львів, Україна, melnyk_natalija@ukr.net)*

ВПЛИВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НІКОЛОВИХ ЗРАЗКІВ НА ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ СИГНАЛІВ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Внаслідок тривалого експлуатування під великим навантаженням феромагнетних елементів конструкцій у різних галузях промисловості України, машинобудуванні та трубопроводному транспорті, необхідно здійснювати постійне технічне діагностування таких виробів та проводити моніторинг реальної дефектності для забезпечення їх надійного використання. Серед сучасних методів і засобів неруйнівного контролю перспективним у вирішенні цієї проблеми є метод магнетопружної акустичної емісії (МАЕ), що полягає у реєструванні та опрацьовуванні вимірювальними засобами пружних імпульсів, ініційованих незворотними стрибкоподібними переміщеннями стінок магнетних доменів [1]. Здеградований матеріал змінює свою доменну структуру, що впливає на зміну параметрів МАЕ, зокрема, підсумковий рахунок сигналу, суму амплітуд, форму та тривалість обвідної сигналів [2–4].

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу прикладеного до досліджуваного нікелового зразка зовнішнього навантаження на інформативні параметри сигналів МАЕ.

В експериментах використовували комплект апаратури для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ [2]. Для досліджень виготовляли експериментальні зразки з ніколу (пластина розмірами 120 × 20 × 2 мм). Перемагнення здійснювали сигналом синусоїдальної форми з частотою 9 Гц, використовуючи накладний П-подібний електромагнет.

На рис. 1 зображено зареєстровані залежності суми амплітуд сигналів МАЕ від амплітуди індукції перемагнечувального поля нікелового зразка за прикладених зусиль одновісного розтягу та під навантаженням σ (яке змінювали від 0 МПа до 60 МПа). З одержаних експериментальних залежностей випливає, що значення суми амплітуд сигналів МАЕ збільшується зі зростанням амплітуди індукції B поля перемагнення за будь-якого навантаження.

За сталої індукції магнетного поля та зі збільшенням прикладених навантажень розтягу сума амплітуд зменшується (рис. 2). Також нами досліджено особливості форми обвідної та залежності тривалості сигналів МАЕ від прикладеного зовнішнього навантаження та амплітуди індукції поля перемагнення (рис. 3, рис. 4).

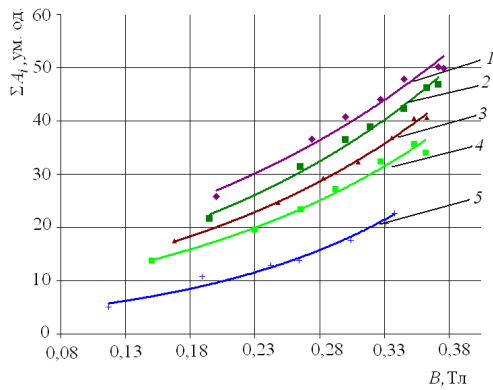


Рис. 1. Залежність суми амплітуд сигналів магнетопружної акустичної емісії від індукції поля перемагнічення (криві 1 – $\sigma = 0$ МПа; 2 – $\sigma = 10$ МПа; 3 – $\sigma = 20$ МПа; 4 – $\sigma = 30$ МПа; 5 – $\sigma = 60$ МПа).

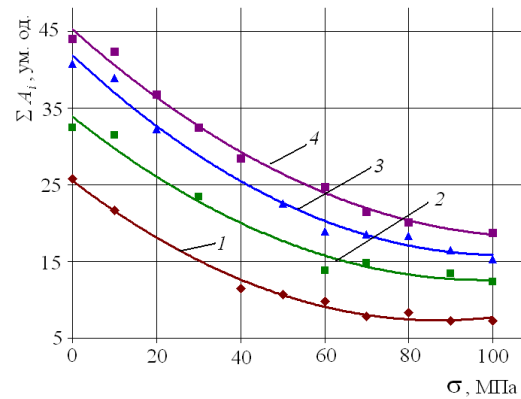


Рис. 2. Вплив прикладених зовнішніх напружень на суму амплітуд сигналів магнетопружної акустичної емісії (криві 1 – $B = 0,2$ Тл; 2 – $B = 0,265$ Тл; 3 – $B = 0,3$ Тл; 4 – $B = 0,35$ Тл).

Зі збільшенням σ та B спостерігаємо зміну форми обвідної (формується один гострий чіткий пік) і зменшення амплітуди та тривалості сигналів МАЕ (розраховано на половині амплітуди сигналу).

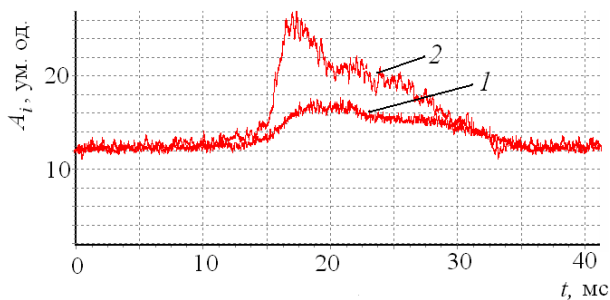


Рис. 3. Особливості форми обвідної сигналів магнетопружної акустичної емісії від прикладеного зовнішнього навантаження $\sigma = 30$ МПа (криві 1 – $B = 0,2$ Тл; 2 – $B = 0,35$ Тл).

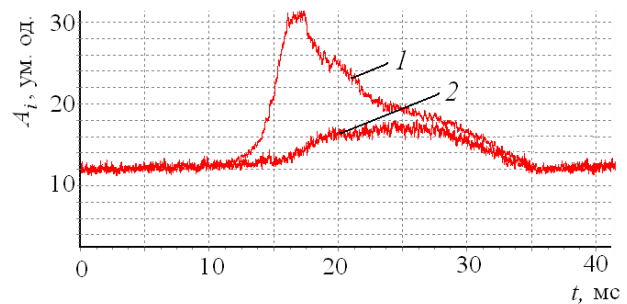


Рис. 4. Особливості форми обвідної сигналів магнетопружної акустичної емісії від амплітуди індукції поля перемагнічення $B = 0,320$ Тл (криві 1 – $\sigma = 0$ МПа; 2 – $\sigma = 80$ МПа).

Проведені дослідження показали, що параметри сигналів МАЕ, зокрема, сума амплітуд, форма обвідної, тривалість є чутливими до напружено-деформованого стану досліджуваного нікелового зразка, що свідчить про можливість застосування даного методу для проведення неруйнівного контролю виробів та елементів конструкцій з феромагнетних матеріалів.

1. Назарчук З.Т., Андрейків О.Є., Скальський В. Р. Оцінювання водневої деградації феромагнетиків у магнетному полі. Київ: Наук. думка, 2013. 272 с.
2. Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П. Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. Київ: Наук. думка, 2014. 304 с.
3. Ono K., Shibata M. Magnetomechanical Acoustic Emission – a New Method of Nondestructive Stress Measurement. *NDT Intern.* 1981, October. P. 227-234.
4. Skalsky V., Hirnyj S., Pochapskyu Ye., Klym B., Plakhtiy R., Tolopko Ya., Dolishniy P. The effect of deformation on the parameters of magnetoacoustic signals. *Вісник Тернопіль. нац. техн. ун-ту.* 2011. Спецвипуск Ч. 1. С. 155-161.

УДК 533.924

М.И. Сазонов, д-р техн. наук, проф.

А.И. Веремейчик, канд. физ.-мат. наук, доц.

А.А. Лазарук

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

(Брест, Беларусь, vai_mrtm@tut.by)

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭРОЗИЯ ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДА ПЛАЗМОТРОНА С ВЫСОКИМ РЕСУРСОМ РАБОТЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ

Одной из основных характеристик электродуговых устройств является ресурс работы катода, испытывающего значительные тепловые нагрузки [1, 2]. В качестве рабочего материала для изготовления катодов плазмотрона наибольшее распространение получил вольфрам, активированный окисями тория, лантана, бария, калия и другими веществами, внесение которых значительно снижает работу выхода электронов из металла и улучшает тем самым его эмиссионную способность при высоких температурах.

Эрозия катода возникает вследствие сложных тепловых, электрических, химических и механических процессов в приэлектродной области. Основной упор в большинстве исследований по эрозии делается на экспериментальное изучение явлений и эмпирическое обобщение опытных данных для того, чтобы в дальнейшем создать обоснованную математическую модель и найти рациональные методы расчета оптимальных конструкций катодов.

Основным фактором, определяющим скорость эрозии, является удельный тепловой поток в катод. Для термоэмиссионных электродов он зависит от рода рабочего газа, силы тока, характера охлаждения электрода и других факторов. Если дуга горит в водороде и гелии, то удельный тепловой поток вследствие высокой теплопроводности этих газов особенно велик. Для защиты катодов при нагреве агрессивных газов в дуговых устройствах наиболее широко используется аргон, благодаря высокой эрозионной стойкости в нем вольфрама. Однако наиболее дешевым газом является азот и применение в плазмотронах азота в качестве защитного газа является экономически целесообразным.

Для исследования эрозии вольфрамового катода и тепловых потерь в него разработан специальный плазмотрон. При изучении влияния интенсивности охлаждения электрода на скорость эрозии вольфрама были использованы катоды двух конструкций. Потеря материала катода определялась путем его взвешивания до и после эксперимента, причем время непрерывной работы плазмотрона и величина потерь материала катода выбирались такими, чтобы удельная эрозия могла быть определена с точностью 10 – 20 %. В силу этого время испытаний варьировалось от 20 минут до 2,5 часов в зависимости от тока дуги.

Ресурс плазмотрона вихревой схемы в значительной мере определяется эрозионной стойкостью катода. Для отыскания путей снижения скорости разрушения катода исследован тепловой поток в него. Основная часть тепловой энергии, величина которой равна $I_i(U_k + U_i - \varphi)$, передается в катод ионами. Потеря тепла катодом в приэлектродной области происходит, главным образом, за счет термоэмиссии электронов и выражается величиной $I_i\varphi$.

Кроме того, теплообмен в области катода происходит излучением нагретой поверхности катода и высокотемпературного газа дуги, конвективным теплообменом, испарением вольфрама и т.д. Вклад этих слагаемых в тепловой поток обозначим через Q . Тогда для оценки теплоотвода вглубь катода воспользуемся формулой [3]

$$Q_k = I \cdot [s(U_k + U_i) - \varphi] + Q, \quad (1)$$

где I – ток дуги; s – доля ионного тока; U_k – катодное падение потенциала; U_i – потенциал ионизации газа; φ – работа выхода электронов.

Согласно [4], катодное падение потенциала в азотной дуге при больших токах равно $7 \pm 2 В$. С целью определения s и Q , влияния на величину теплового потока условий отвода тепла от места привязки дуги были проведены калориметрические измерения в диапазоне изменения токов 200 – 1000 А при диаметре вольфрамовых стержней $d_c = 3 - 9$ мм и различных интенсивностях их охлаждения. Установлено, что в исследованном диапазоне токов зависимость $Q = f(I)$ можно описать линейной функцией тока, при этом $s=0,3$ и $Q=586$ Вт.

Из сравнения величин теплового потока для различных диаметров вольфрамовых стержней и способов их заделки следует, что для таких катодов тепловой поток не зависит от интенсивности охлаждения стержня и его диаметра. Таким образом, формулу для расчета Q_k в случае азотной дуги можно представить в виде

$$Q_k = 3,82 I + 586, \text{ Вт} \quad (2)$$

Полученные данные по тепловым потокам в катод подтверждают, что основными прикатодными процессами, определяющими энергетический баланс на катоде, являются передача тепла ионами и термоэмиссия электронов.

1. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э. К расчету течения плазмы вблизи профилированной поверхности катода электрической дуги. *Теплофизика высоких температур*. 2005. Т. 43, Вып. 2. С. 175-180.

2. Андерс А., Окс Е.М., Юшков Г.Ю., Савкин К.П., Браун Я., Николаев А.Г. Определение удельной ионной эрозии катода вакуумной дуги на основе измерения полного ионного тока из разрядной плазмы. *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76, Вып. 10. С. 57-61.

3. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А. Исследование термохимических катодов в дуговых плазмотронах. *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12, № 4. С. 685-691.

4. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. Москва: Изд-во иностранной литературы, 1961. 369 с.

УДК 539.4: 620.17

В.В. Сатокін
П.Б. Мусієнко

*Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»
(Дніпро, Україна, info@yuzhnoe.com)*

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ КОРПУСА СОПЛА РДТП ПРИ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

При проведенні випробувань таких конструкцій як сопло ракетного двигуна на твердому паливі (РДТП) контроль рівня навантажень, контроль деформування і визначення його рівня є найважливішими, а встановлення датчиків деформації проводиться за результатами розрахунків міцності.

Авторами пропонується проводити неруйнівний контроль стану корпусу сопла РДТП за допомогою «методу Галогена», описаного у [1].

«Метод Галогена», як метод порівняння геометрії світлового сліду до і після випробувань, дає можливість визначати рівень внутрішнього тиску при навантаженні корпусу сопла РДТП, визначати рівень і місце максимальних деформацій у кожній з конструкцій індивідуально, наприклад при випробуваннях на герметичність. Визначення таких місць дасть змогу більш коректно встановлювати датчики деформації саме для поточної конструкції сопла РДТП.

Проведене порівняння стану корпусу сопла РДТП до і після випробувань з використанням «методу Галогена» після аналізу рівня і місця залишкових деформацій дає можливість розробити систему візуального вимірювання параметрів деформування під час натурних випробувань, як метод неруйнівного контролю.

1. Сатокін В.В., Мусієнко П.Б. Виртуальные испытания корпуса сопла РДТТ. *Космическая техника. Ракетное Вооружение*. Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2015. № 3. С. 46-49.

УДК 539.3/4:620.179.17

В.Р. Скальський, чл.-кор. НАН України

О.М. Станкевич, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Фізико-механічний інститут ім. В.Г. Карпенка НАН України

(Львів, Україна, rminasu@ipm.lviv.ua)

ІДЕНТИФІКУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ ВОЛОКОННИХ КОМПОЗИТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АЕ

Протягом останніх років невпинно розширюється використання композитних матеріалів (КМ) як конструкційних компонент у багатьох галузях промисловості, зокрема в авіаційній, ракетно-космічній, автомобільній, хімічній, машинобудівній тощо. Діагностують стан КМ різними методами неруйнівного контролю, однак перевагу надають методу акустичної емісії (АЕ) [1]. Для часової локалізації особливостей руйнування таких матеріалів під час аналізу сигналів АЕ застосовують метод вейвлет-перетворення (ВП).

Широкого використання для армування КМ набули арамідні волокна [2]. На їх властивості суттєво впливає скручування ниток, що спричинює їх поверхневе пошкодження, а відтак, суттєве зниження міцності. Для продовження довговічності поверхні волокна здійснюють його апретування (просочування), плазмову обробку, іонне травлення тощо.

Мета досліджень – ідентифікувати механізми руйнування композита, армованого арамідним волокном, за параметрами ВП сигналів АЕ.

Досліджували руйнування зразків композита під дією квазістатичного розтягу. КМ структурно складався з одиничного р-арамідного волокна діаметром 10 мкм, укладеного в двокомпонентну епоксидну матрицю зі співвідношенням затверджувача до епоксидної складової 50:50. Для покращення адгезії та механічних властивостей волокно попередньо обробили в полі низькотемпературної високочастотної плазми. Зразки розтягували на розривній машині типу СВР-5 зі швидкістю навантаження 4×10^{-7} м/с. Відбір АЕ-інформації здійснювали системою SKOP-8M [3]. Особливості руйнування композита вивчали за енергетичним показником E_{WT} неперервного ВП (НВП) [4] та енергетичним розподілом дискретного ВП (ДВП) сигналів АЕ [1]. Оскільки крок дискретизації аналогового сигналу був 0,25 мкс, то згідно з ДВП найбільша частота, присутня в сигналі АЕ, дорівнює 2 МГц. Тоді відповідність рівнів розкладу ДВП та частотних діапазонів така: D1 – 1...2 МГц; D2 – 0,5...1 МГц; D3 – 0,25...0,5 МГц; D4 – 0,125...0,25 МГц; A4 – 0...0,125 МГц. Рівень D1 (1...2 МГц) не аналізували, оскільки він виходив за межі смуги робочих частот вимірювального каналу.

За розподілом енергії на рівнях розкладу всі зареєстровані сигнали розділили на дві групи: із максимальною енергією на рівні D3

(0,25...0,5 МГц) – тип I та D4 (0,125...0,25 МГц) – тип II, що співпало з проведеним раніше їх спектральним аналізом.

Аналізували розподіл у часі зареєстрованих під час експерименту сигналів АЕ за енергетичним параметром, домінуючою частотою та тривалістю випромінювання. Встановили, що на початкових стадіях для сигналів АЕ енергетичний параметр $0,01 \leq E_{WT} \leq 0,042$, тривалість випромінювання Δt до 10 мкс, а частота, яка відповідає максимальному вейвлет-коефіцієнту WT_{max} , знаходиться у діапазоні 300...320 кГц. За ДВП такі сигнали віднесли до I типу, а згідно з енергетичним критерієм вони характеризують в'язко-крихке руйнування.

Зі збільшенням навантаження генерувались сигнали АЕ, в яких частота, яка відповідає максимальному вейвлет-коефіцієнту WT_{max} , така ж як на початковій стадії руйнування, але зростають значення енергетичного параметра $0,136 \leq E_{WT} \leq 0,178$ та тривалість випромінювання Δt до 15 мкс. Тобто за ДВП їх також віднесли до I типу, а за енергетичним критерієм вони характеризують крихке руйнування (поширення макротріщини).

У цей же час спостерігали сигнали АЕ з енергетичним параметром $0,036 \leq E_{WT} \leq 0,048$, тривалістю випромінювання $\Delta t = 9...12$ мкс та частотою, яка відповідає максимальному вейвлет-коефіцієнту WT_{max} , у діапазоні 200...250 кГц. Отже, за ДВП такі сигнали віднесли до II типу, а згідно з енергетичним критерієм вони відповідають в'язко-крихкому руйнуванню.

Порівнюючи відомі літературні дані та результати здійсненого аналізу, сигнали типу I віднесли до таких, що супроводжують відшарування волокна від матриці, а типу II – руйнування волокна (поширення поздовжніх та поперечних тріщин у волокні).

Наприкінці руйнування зразків реєстрували сигнали АЕ, які мали більше одного спектрального максимуму, що свідчить про накладання у часі різних механізмів руйнування КМ. За НВП та ДВП ідентифікували сигнали АЕ від діагональних зсувних механізмів та розтріскування матриці, розриву арамідного волокна, що призвело до руйнування зразка.

Отже, за аналізом параметрів НВП та ДВП сигналів АЕ під час розтягу композита, армованого арамідним волокном, і відомих у літературі досліджень встановили відповідність між механізмами руйнування та сигналами АЕ, що їх супроводжують. Результати підтверджено оптико-поляризаційним методом неруйнівного контролю.

1. Скальський В.Р., Божидарнік В.В., Станкевич О.М. Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. Київ: Наук. думка, 2014. 264 с.

2. Singh T.J., Samanta S. Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2, No. 4/5. P. 1381-1387.

3. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. посіб. У 3 т. Київ: Наук. думка, 2009. Т. 2. 264 с.

4. Stankevych O., Skalsky V. Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016. Vol. 164. P. 24-34.

УДК 536.24

О.С. Цаканян, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

С.В. Кошель, канд. техн. наук

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины
(Харьков, Украина, koshel@nas.gov.ua)*

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСХОДА ВОЗДУХА В КАНАЛАХ, ВЫХОДАХ АНЕМОСТАТОВ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ

При создании систем вентиляции и кондиционирования очень важно правильно рассчитать объемы притока и оттока воздуха не только в целом, а и его распределение на приточных анемостатах и вентиляционных решетках, установленных в помещении. Если на этапе проектирования допущена ошибка или требуется перераспределение воздуха в каналах и элементах вентиляционной системы по тем или иным причинам, без измерений расхода воздуха не обойтись. Существующие способы измерений слишком трудоемки и требуют немалых временных затрат при настройке вентиляционной системы.

В Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины разработан интегральный термоанемометр новой конструкции, использование которого значительно упрощает измерительный процесс, сводя его к единовременному измерению средних значений температуры и расхода воздуха в сечении воздухопроводов или на входах и выходах решеток и анемостатов. Этим он отличается от других приборов, которые могут измерять скорость воздуха в точке.

Для цилиндрических каналов зонд термоанемометра (эскиз представлен на рис. 1а) выполнен из обечайки 1, держателей 2, на которых крепится гибкий чувствительный элемент (рис. 1б) 3, и клеммной колодки 4. Чувствительный элемент состоит из центральной несущей жилы 5, имеющей большое электрическое сопротивление, слабо зависящее от температуры. Жила покрыта электроизолирующей оболочкой 6, поверх которой навит тонкий эмалированный провод 7, величина сопротивления которого зависит от температуры. Концы жилы и провода подключены к клеммной колодке 4, вынесенной на внешнюю поверхность канала.

Измерительный зонд имеет два режима работы – пассивный и активный. Пассивный режим служит для измерения интегральной температуры воздушного потока, когда зонд представляет собой термометр сопротивления. Измерительный ток, проходящий по внешней оболочке чувствительного элемента, имеет малую величину, а выделяемая тепловая энергия практически не оказывает влияния на точность измерения температуры. Активный режим предназначен для измерения расхода или средней скорости воздушного потока, следующего через канал. В этом режиме по центральной жиле протекает ток значительной величины и выделяемая тепловая энергия нагревает внешнюю

оболочку чувствительного элемента, изменяя ее сопротивление, зависящее от температуры.

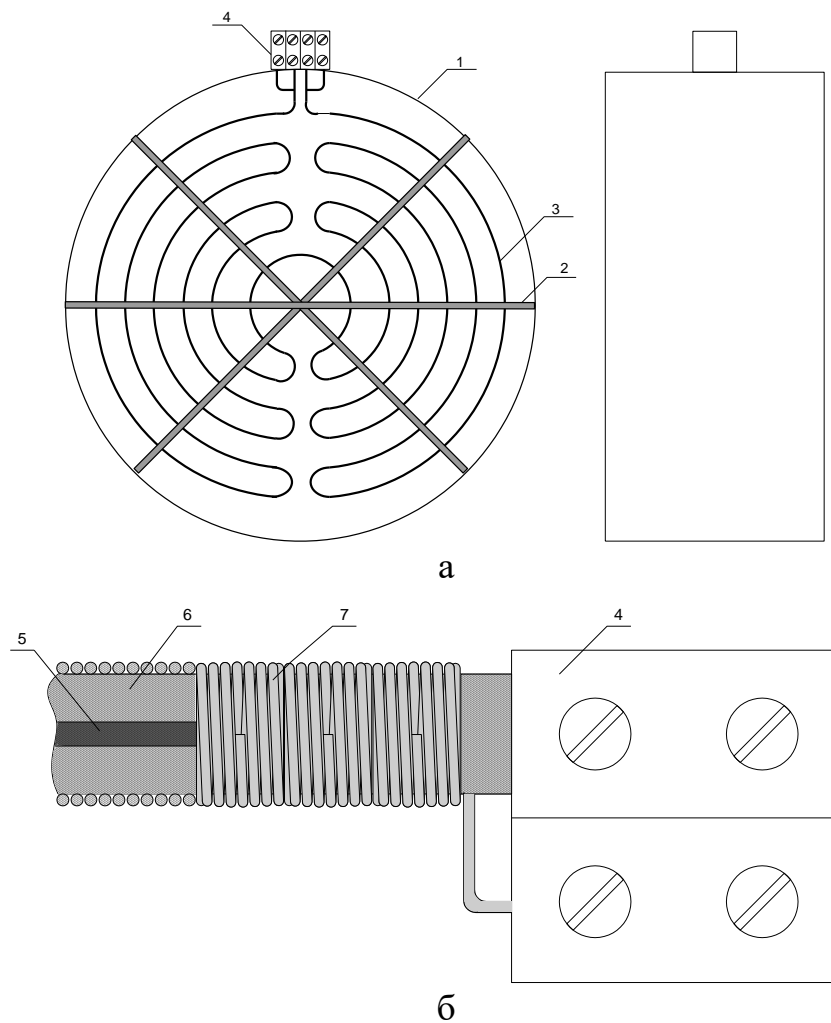


Рис. 1. Термоанемометр:

а – эскиз измерительного зонда, б – эскиз чувствительного элемента и схема его закрепления на клеммную колодку:

1 – обечайка; 2 – направляющие, 3 – чувствительный элемент,
4 – клеммная колодка; 5 – центральная жила, 6 – электроизолирующая оболочка, 7 – тонкий эмалированный провод

Предварительно в лабораторных условиях проводится градуировка зонда при различных скоростях и устанавливается зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздушного потока. Для того, чтобы иметь возможность измерять параметры воздушного потока на различных объектах, необходимо полное воссоздание условий, при которых он градуировался, то есть обеспечить аналогичную структуру течения воздуха и исключить его турбулизацию. Для этой цели служат переходные воздухосборники, которые своей конструкцией позволяют измерительному зонду термоанемометра находиться в условиях, аналогичных тем, которые были при градуировке.